

Вестник Донского государственного технического университета

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ И НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Vestnik of Don State Technical University

Том 16
№ 1 (84)
2016

ISSN 1992-5980
DOI 10.12737/issn.1992-5980

1. **Механика**
   Mechanics
2. **Машиностроение и машиноведение**
   Machine Building and Machine Science
3. **Информатика, вычислительная техника и управление**
   Information Technology, Computer Science, and Management
4. **Процессы и машины агроинженерных систем**
   Processes and Machines of Agro-Engineering Systems
5. **Безопасность деятельности человека**
   Safety of Human Activity

vestnik.donstu.ru

ВЕСТНИК ДОНСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА 2016

Т. 16, № 1 (84)

Теоретический и научно-практический журнал

Включен в перечень рецензируемых научных изданий, в котором должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук в соответствии с требованиями приказа Минобрнауки России от 25.07.2014 г. №793 с изменениями, внесенными приказом Минобрнауки России от 03.06.2015 г. №560

Издаётся с 1999 г.

Выходит 4 раза в год
январь-март 2016 г.

Учредитель и издатель — Донской государственный технический университет

Над номером работали: И. В. Бойко, М. П. Смирнова (англ. версия)
Подписано в печать 29.03.2016., дата выхода в свет 31.03.2016.
Формат 60×84/8. Гарнитура «Times New Roman» Печать офсетная.
Усл. печ. л. 22,6. Тираж 1000 экз. Заказ № 25/3 Цена свободная.

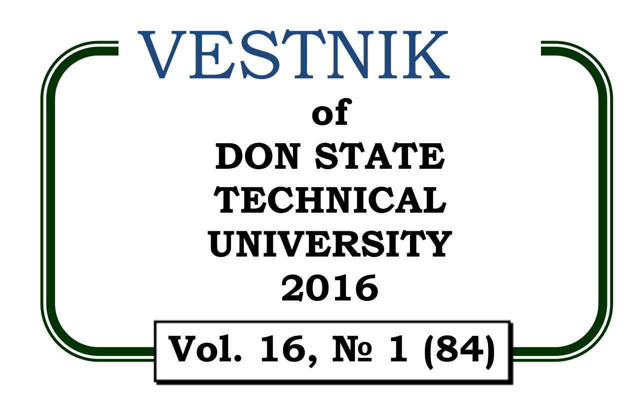
Адрес редакции:
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-565.

Адрес издателя:
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-565.

Адрес полиграфического предприятия:
344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1, тел. +7 (863) 2-738-661, 2-738-565.

http://science.donstu.ru

Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС 77-35012 от 16.01.09., выдано Федеральной службой по надзору в сфере связи и массовых коммуникаций



**Theoretical
and scientific-practical journal**

Included in the list of peer-reviewed scientific editions where the basic research results of doctoral, candidate's theses should be published in accordance with order of Ministry of Education and Science of RF no. 793, July 25, 2014, as amended by order of the Ministry of Education and Science of RF no.560, June 3, 2015.

4 issues a year
January - March 2016

Founder and publisher — Don State Technical University

The issue is prepared by: Inna V. Boyko, Marina P. Smirnova (English version)
Passed for printing 29.03.2016, imprint date 31.03.2016.
Format 60×84/8. Font «Times New Roman». Offset printing.
C.p.sh. 22.6. Circulation 1000 cop. Order 25/3 Free price.
Editorial Board's address:
Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia. Phone: +7 (863) 2-738-565.
Publisher's address:
Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia. Phone: +7 (863) 2-738-565.
Printery address:
Gagarin Sq. 1, Rostov-on-Don, 344000, Russia. Phone: +7 (863) 2-738-661, 2-738-565.
http://science.donstu.ru
Certificate of mass media registration ПИ № ФС 77-35012 of 16.01.09. issued by the Federal Service for Supervision in the Sphere of Communications and Mass Communications

СОДЕРЖАНИЕ

CONTENT

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 519.6 DOI 10.12737/ 18131

Усовершенствованный попеременно-треугольный метод численного решения пространственно-трехмерных задач фильтрации двухфазной несжимаемой жидкости*

А. И. Сухинов[1], **Л. А. Григорян**[2], **А. А. Сухинов**[3]**
[1]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2]Северо-Кавказский федеральный университет, г. Ставрополь, Российская Федерация
[3]Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Advanced alternate triangular method of numerical solution of spatial three-dimensional problems of two-phase filtration of incompressible fluid ***

A. I. Sukhinov[1], **L. A. Grigoryan**[2], **A. A. Sukhinov**[3]**
[1]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2]North Caucasus Federal University, Stavropol, Russian Federation
[3]Southern Federal University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью данной работы является рассмотрение пространственно-трехмерной модели Баклея — Леверетта фильтрации двухфазной несжимаемой жидкости «нефть — вода» в приближении Буссинеска и ее численная реализация усовершенствованным вариантом модифицированного попеременно-треугольного метода (МПТМ), учитывающим специфику функций точечных источников, имеющих дельтаобразный характер. Для предложенного усовершенствованного варианта МПТМ выполнено построение набора итерационных параметров и получены необходимые оценки спектральных параметров метода. Оценка скорости сходимости итерационного процесса асимптотически эквивалентна оценке для базового итерационного МПТМ, предложенного ранее А. А. Самарским и Е. С. Николаевым. Построенный вариант итерационного метода был применен для решения модельной задачи фильтрации — вытеснения нефти методом заводнения в существенно неоднородном пласте, для которого значения коэффициента проницаемости менялись более чем в 104 раза. Что касается вычислительной эффективности такого подхода, то число итераций сократилось в 10–70 раз по сравнению с традиционно используемыми итерационными методами — Зейделя и верхней релаксации с шахматной упорядоченностью узлов.

Ключевые слова: модели фильтрации Баклея — Леверетта, двухфазная несжимаемая жидкость, разностные схемы, итерационный попеременно-треугольный метод, итерационные параметры.

The work objective is to consider a space 3D Buckley –Leverett filtration model of the two-phase incompressible liquid “oil-water” to Boussinesq approximation, and its numerical solution by the modified alternate triangular method (MATM) with account for the specificity of the point source functions with delta-like character. For the proposed advanced MATM version, a set of iteration parameters is built, and the needed estimates of the method spectral parameters are obtained. The estimation of the convergence rate of the iteration process is asymptotically equivalent to the assessment for the base iterative MATM proposed earlier by A.A. Samarsky and E.S. Nikolaev. The constructed iteration method modification is applied to solve a model task of filtering-displacement of oil by the flooding method in the essentially heterogeneous stratum for which permeability coefficient values have been changed by more than 104 times. As for the computational efficiency of this approach, the number of iterations is reduced by 10-70 times as compared with the widely used techniques – Seidel method, and the overrelaxation with checkered nodes ordering.

Keywords: Buckley – Leverett filtration models, two-phase incompressible liquid, difference schemes, iteration alternate triangular method, iteration parameters.

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 15-01-08619-а), а также в рамках Программы Президиума РАН «Фундаментальные проблемы математического моделирования».
** E-mail: sukhinov@gmail.com, honey.lusine@mail.ru, andreysukhinov@gmail.com
*** The research is supported in part by RFFI (grant 15-01-08619-a) and is done within the frame of the RAS Presidium Program “Fundamental research challenges of mathematical modeling”.

Введение. В современных условиях для решения значимых задач проектирования разработок нефтяных месторождений (РНМ) и совершенствования технологии добычи углеводородного сырья используется методология математического моделирования и комплексы программ, реализующих современные вычислительные методы [1, 2]. Важный класс задач, возникающих при проектировании РНМ, — задачи фильтрации многофазных жидкостей в пористых средах, сформулированные при тех или иных упрощающих предположениях. Данный класс задач после дискретизации приводит к сеточным уравнениям, которые могут иметь размерности 10^5–10^9 и должны решаться многократно (многие десятки, сотни тысяч раз) для временных промежутков, составляющих десятки месяцев. В практике вычислительных методов решения задач данного класса широко применяется *IMPES*-метод (*IMplicit on Pressure and Explicit on Saturation*) — неявный по давлению и явный по насыщенности [3]. Поэтому основной объем вычислительной работы приходится на решение уравнений эллиптического типа в относительно небольшом числе узлов сетки с функциями источников, отличными от нуля и имеющими характер дельта-функций (функций точечных источников) для определения давления. Следует учитывать данную специфику сеточного оператора задачи. В противном случае, а также при недостаточной обусловленности системы разностных уравнений, вызванной высокой размерностью и существенной неоднородностью характеристик пластовой системы, снижается качество вычислений. В первую очередь следует отметить, что замедляются итерационные процессы, а при использовании техники чебышевского ускорения наблюдается потеря сходимости метода, обусловленная ошибкой в определении спектральных характеристик операторов. В данной работе указанная проблема снимается за счет построения оператора-предобусловливателя, содержащего член, обусловленный наличием источников и корректных спектральных двухсторонних оценок для оператора-предобусловливателя.

1. Непрерывная пространственно-трехмерная модель двухфазной фильтрации. Нефтеводоносный пласт может существенным образом менять глубину залегания и (или) иметь существенную толщину и неоднородность по вертикали. В таких случаях требуется использование пространственно-трехмерной модели, учитывающей влияние силы тяжести, толщины пласта и неоднородности его параметров по вертикали. Будем использовать Декартову систему координат — ось Ox направлена на север, ось Oy — на восток, Oz — вертикально вниз. Процесс фильтрации рассматривается в пространственно-трехмерной области G — цилиндрической области с боковой поверхностью $\Sigma(x,y)$, $(x,y)\in\Gamma$, $\Gamma=\bar{D}\setminus D$, ограниченной снизу поверхностью подошвы пласта, задаваемой функцией поверхности $z=H_b(x,y)$, $(x,y)\in D$, $\mathrm{D}\in\mathrm{R}^2$, а сверху — поверхностью кровли пласта $z=H_r(x,y)$, $(x,y)\in D$.

В отношении граничных поверхностей области G предполагается их достаточная гладкость, необходимая для корректной постановки задачи. Заметим, что в этом случае граничная поверхность Γ области G состоит из объединения достаточно гладких поверхностей $\Gamma\equiv H_b\bigcup H_r\bigcup\Sigma$, $\bar{\mathrm{G}}=G\bigcup\Gamma$.

Для проницаемой кровли пласта уравнения, описывающие процесс фильтрации в переменных «давление — водонасыщенность», в случае несжимаемости сред имеют вид:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\left(\frac{f_1(s)k_h}{\mu_1}+\frac{f_2(s)k_h}{\mu_2}\right)\frac{\partial p}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\left(\frac{f_1(s)k_h}{\mu_1}+\frac{f_1(s)k_h}{\mu_2}\right)\frac{\partial p}{\partial y}\right)+$$
$$+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{f_1(s)k_v}{\mu_1}\left(\frac{\partial p}{\partial z}+g\rho_1\right)+\frac{f_2(s)k_v}{\mu_2}\left(\frac{\partial p}{\partial z}+g\rho_2\right)\right)+q_1=0\,, \tag{1}$$

$$m\frac{\partial s}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{f_2(s)k_h}{\mu_2}\frac{\partial p}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{f_2(s)k_h}{\mu_2}\frac{\partial p}{\partial y}\right)+$$
$$+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{f_2(s)k_v}{\mu_2}\left(\frac{\partial p}{\partial z}+g\rho_2\right)\right)+q_2\,. \tag{2}$$

В уравнениях (1), (2): $s=s(x,y,z,t)$ — водонасыщенность; $f_1(s), f_2(s)$ — относительные фазовые проницаемости для нефти и воды соответственно; m — пористость пласта; μ_1, μ_2 — динамические вязкости нефти и воды соответственно; ρ_1, ρ_2 — плотности нефти и воды соответственно, а p_1, p_2 — их фазовые давления соответственно; k_h, k_v — коэффициенты абсолютной проницаемости соответственно в горизонтальном и вертикальном направлениях. Здесь мы отметим следующее: как правило, k_h значительно больше k_v и k_v существенно изменяется в зависимости от координаты z.

Будем считать, что на скважинах задаются либо дебиты, либо забойные давления. В качестве функциональных зависимостей для задания $f_1(s), i=1,2$ будем использовать полиномы второго порядка относительно переменной s.

Граничные условия будем рассматривать в связи с тем, является ли граница Γ области G проницаемой. На непроницаемой границе поток по нормали должен быть равен нулю, что приводит к условию $\frac{\partial p}{\partial n} = 0$. На проницаемой границе, которой также является контур, ограничивающий скважину, будем рассматривать граничные условия 1-го и 2-го рода. Пусть w_n — суммарный поток многофазной жидкости. Предположим, совместное движение фаз

$$w_n = w_1 + w_2,$$

где w_1, w_2 — потоки нефти и воды соответственно, удовлетворяющие условиям: $w_i = -k\frac{f_i(s)}{\mu_i} grad\ p$.

Граничные условия 2-го рода реализуются, когда задан поток, закачиваемый (отбираемый) на части цилиндрической границы Σ_1:

$$w_n(x, y, z, t) = W(x, y, z, t), \quad (x, y, z) \in \Sigma_1,\ 0 \le t \le t_0,$$
$$s(x, y, z, t) = S(x, y, z, t), \quad (x, y, z) \in \Sigma_1,\ 0 \le t \le t_0,$$

а также для отбора, заданного на части цилиндрической границы Σ_2:

$$w_n(x, y, t) = W(x, y, t),\ (x, y, z) \in \Sigma_2,\ 0 \le t \le t_0,$$

или давления

$$w_n(x, y, t) = W(x, y, t),\ (x, y, z) \in \Sigma_2,\ 0 \le t \le t_0,$$
$$p(x, y, t) = P(x, y, t),\ (x, y, z) \in \Sigma_2,\ 0 \le t \le t_0.$$

Разумеется, на части цилиндрической поверхности Σ_3 также могут быть заданы условия непроницаемости.

2. Дискретизация пространственно-трехмерной модели фильтрации на основе метода неявного по давлению и явного по насыщенности. Ранее МПТМ для двумерных задач фильтрации с огрубленными спектральными оценками рассматривался в работе [4], а для уравнений параболического типа — в монографии [5]. МПТМ для случая несамосопряженного оператора сеточной задачи при ограниченном значении числа Пекле, предназначенный для решения задач морской гидродинамики, был построен и исследован в работах [6, 7]. Далее рассматривается как наиболее распространенный алгоритм дискретизации задачи, базирующийся на *IMPES* — методе, неявном по давлению и явном по насыщенности. Также будем считать, что $G(x, y, z)$ — область, в которой требуется найти решение задачи (1)–(2), — параллелепипед. В области G используем равномерную пространственную сетку $\bar{\omega}_h$:

$$\bar{\omega}_h = \left\{ x_i = ih_x,\ y_j = jh_y,\ z_k = kh_z, 0 \le i \le N_x, 0 \le j \le N_y, 0 \le k \le N_z \right\}$$

и неравномерную временную сетку $\hat{\omega}_\tau$.

Аналогично предыдущему определим пространственно-временную сетку $\omega_{h\tau} = \omega_h x \hat{\omega}_\tau$.

Разностные аппроксимации уравнений (1) и (2) во внутренних узлах сетки $\bar{\omega}_h$ имеют вид для уравнения (2):

$$\frac{1}{h_x^2}\left(P_{i-1,j,k} - P_{i,j,k}\right)B^{(1)}_{i-\frac{1}{2},j,k} - \frac{1}{h_x^2}\left(P_{i,j,k} - P_{i+1,j,k}\right)B^{(1)}_{i+\frac{1}{2},j,k} +$$
$$+\frac{1}{h_y^2}\left(P_{i,j-1,k} - P_{i,j,k}\right)B^{(2)}_{i,j-\frac{1}{2},k} - \frac{1}{h_y^2}\left(P_{i,j+1,k} - P_{i,j,k}\right)B^{(2)}_{i,j+\frac{1}{2},k} +$$
$$+\frac{1}{h_z^2}\left(P_{i,j,k-1} - P_{i,j,k}\right)B^{(3)}_{i,j,k-\frac{1}{2}} - \frac{1}{h_z^2}\left(P_{i,j,k} - P_{i,j,k+1}\right)B^{(3)}_{i,j,k+\frac{1}{2}} +$$
$$+\frac{g\rho_1}{\mu_1 h_z}\left(0,5\left(f_{1i,j,k-1} + f_{1i,j,k}\right)k_{v\,i,j,k-0,5} - 0,5\left(f_{1i,j,k+1} + f_{1i,j,k}\right)k_{v\,i,j,k+0,5}\right) +$$
$$+\frac{g\rho_2}{\mu_2 h_z}\left(0,5\left(f_{2\,i,j,k-1} + f_{2\,i,j,k}\right)k_{v\,i,j,k-0,5} - 0,5\left(f_{2\,i,j,k+1} + f_{2\,i,j,k}\right)k_{v\,i,j,k+0,5}\right) =$$

$$= \begin{cases} 0 - \textit{если узел вне скважины;} \\ -B_{gi,j,k}\left(P_{w\,i,j,k} - P_{i,j,k}\right) - \textit{если узел находится на нагнетательной скважине;} \\ -B_{gi,j,k}\left(P_{o\,i,j,k} - P_{i,j,k}\right) - \textit{если узел находится на эксплуатационной скважине.} \end{cases} \quad (3)$$

Следует отметить, что значения функций относительной фазовой проницаемости в уравнении (3) и в уравнении (4) в зависимости от значений функции водонасыщенности вычисляются на предыдущем временном слое (метод явный по функции водонасыщенности):

$$mH\frac{s_{i,j,k}^{n+1}-s_{i,j,k}^{n}}{\tau_{n+1}}-\frac{1}{\mu_2 h_x^2}\left(\delta_1^- f_{2\,i-1,j,k}k_{hi-1,j,k}+\delta_1^+ f_{2\,i,j,k}k_{hi,j,k}\right)\left(P_{i-1,j,k}-P_{i,j,k}\right)+$$

$$+\frac{1}{\mu_2 h_x^2}\left(\delta_2^- f_{2\,i,j,k}k_{hi,j,k}+\delta_2^+ f_{2\,i+1,j,k}k_{hi+1,j,k}\right)\cdot\left(P_{i,j,k}-P_{i+1,j,k}\right)-$$

$$-\frac{1}{\mu_2 h_y^2}\left(\delta_3^- f_{2\,i,j-1,k}k_{hi,j-1,k}+\delta_3^+ f_{2\,i,j,k}k_{hi,j,k}\right)\left(P_{i,j-1,k}-P_{i,j,k}\right)+$$

$$+\frac{1}{\mu_2 h_y^2}\left(\delta_4^- f_{2\,i,j,k}k_{hi,j,k}+\delta_4^+ f_{2\,i,j+1,k}k_{hi,j+1,k}\right)\left(P_{i,j,k}-P_{i,j+1,k}\right)-$$

$$-\frac{1}{\mu_2 h_z^2}\left(\delta_5^- f_{2\,i,j,k-1}k_{vi,j,k-1}+\delta_5^+ f_{2\,i,j,k}k_{vi,j,k}\right)\left(P_{i,j,k-1}-P_{i,j,k}\right)+$$

$$+\frac{1}{\mu_2 h_z^2}\left(\delta_6^- f_{2\,i,j,k}k_{vi,j,k}+\delta_6^+ f_{2\,i,j,k+1}k_{vi,j,k+1}\right)\left(P_{i,j,k}-P_{i,j,k+1}\right)-$$

$$-\frac{g\rho_2}{\mu_2 h_z}\left(\delta_5^- f_{2\,i,j,k-1}k_{vi,j,k-1}+\delta_5^+ f_{2\,i,j,k}k_{vi,j,k}\right)+\frac{g\rho_2}{\mu_2 h_z}\left(\delta_6^+ f_{2\,i,j,k+1}k_{vi,j,k+1}+\delta_6^- f_{2\,i,j,k}k_{vi,j,k}\right)=$$

$$=\begin{cases}0-\textit{если узел вне скважины};\\ B_{gi,j,k}\left(P_{w\,i,j,k}-P_{i,j,k}\right)-\textit{если узел находится на нагнетательной скважине;}\\ B_{gi,j,k}\left(P_{o\,i,j,k}-P_{i,j,k}\right)s^n{}_{i,j,k}-\textit{если узел находится на эксплуатационной скважине.}\end{cases}\quad(4)$$

Забойные давления на нагнетательной и эксплуатационной скважинах соответственно: $P_{w\,i,j,k}$, $P_{o\,i,j,k}$;

$$B_{g\,i,j,k}=\lambda k_{hi,j,k}h_z\left(\frac{f_1(s)}{\mu_1}+\frac{f_2(s)}{\mu_2}\right)\Bigg|_{i,j,k},\quad \lambda=\frac{2\pi}{\ln\frac{h}{r_c}-1,5\ln 2-c}.\quad(5)$$

Символы $\delta_1^+,\delta_2^+,\delta_3^+,\delta_4^+,\delta_5^+,\delta_6^+$ $\delta_1^-,\delta_2^-,\delta_3^-,\delta_4^-,\delta_5^-,\delta_6^-$ определяются из условий: $\delta_l^+=(1-\delta_l^-)$, $\ell=1,2,3,4,5,6$

$$\delta_1^-=\begin{cases}1-\textit{если } P_{i-1,j,k}-P_{i,j,k}\ge 0,\\ 0-\textit{в противном случае;}\end{cases}\quad \delta_2^-=\begin{cases}1-\textit{если } P_{i,j,k}-P_{i+1,j,k}\ge 0,\\ 0-\textit{в противном случае;}\end{cases}$$

$$\delta_3^-=\begin{cases}1-\textit{если } P_{i,j-1,k}-P_{i,j,k}\ge 0,\\ 0-\textit{в противном случае;}\end{cases}\quad \delta_4^-=\begin{cases}1-\textit{если } P_{i,j,k}-P_{i,j+1,k}\ge 0,\\ 0-\textit{в противном случае;}\end{cases}\quad(6)$$

$$\delta_5^-=\begin{cases}1-\textit{если } P_{i,j,k-1}-P_{i,j,k}\ge 0,\\ 0-\textit{в противном случае;}\end{cases}\quad \delta_6^-=\begin{cases}1-\textit{если } P_{i,j,k}-P_{i,j,k+1}\ge 0,\\ 0-\textit{в противном случае.}\end{cases}$$

Приведем соотношения, определяющие коэффициенты разностных схем (3), (4), полученные интегрально-интерполяционным методом.

$$B^{(1)}_{i\pm\frac{1}{2},j,k}=\left|\left[\frac{1}{h_x}\int_{x_i}^{x_{i\pm1}}\frac{\mu_1\mu_2 dx}{k_h(x,y_j,z_k)\left(\mu_1 f_2\left(s(x,y_j,z_k)\right)+\mu_2 f_1(x,y_j,z_k)\right)}\right]^{-1}\right|,$$

$$B^{(2)}_{i,j\pm\frac{1}{2},k}=\left|\left[\frac{1}{h_y}\int_{y_i}^{y_{i\pm1}}\frac{\mu_1\mu_2 dy}{k_h(x_i,y,z_k)\left(\mu_1 f_2(x_i,y,z_k)+\mu_2 f_1(x_i,y,z_k)\right)}\right]^{-1}\right|,$$

$$B^{(3)}_{i,j,k\pm\frac{1}{2}}=\left\|\left[\frac{1}{h_z}\int_{z_k}^{z_{k\pm1}}\frac{\mu_1\mu_2 dz}{k_v(x_i,y_j,z)\left(\mu_1 f_2\left(s(x_i,y_j,z)\right)+\mu_2 f_1(x_i,y_j,z)\right)}\right]^{-1}\right\|. \qquad (7)$$

3. Усовершенствование модифицированного попеременно-треугольного метода решения пространственно-трехмерной разностной задачи двухфазной фильтрации. Будем для простоты рассматривать граничные условия 1-го рода. Систему разностных уравнений (6) запишем в стандартном виде [8]:

$$-\sum_{\alpha=1}^{3}\left(a_\alpha^{+1}y_{x_\alpha}\right)_{\bar{x}_\alpha}+q(x)y(x)=\varphi(x),\ x\in\omega, \qquad (8)$$

$$y(x)=\mu(x),\ x\in\gamma,\ \gamma\in\Gamma, \qquad (9)$$

$$0<c_1\le a_\alpha(x)\le c_2\ \ q(x)\ge 0,\ \forall x\in\omega.$$

Здесь Γ — граница прямоугольного параллелепипеда $\bar{G}=\{0\le x_\alpha\le l_\alpha,\ \alpha=1,2,3\}$, $\bar{\omega}=\omega+\gamma$ — равномерная сетка, покрывающая область $\bar{G}$, γ — множество граничных узлов сетки.

Связь между коэффициентами уравнений (8) и (3) задается очевидным образом

$$a_1^{+1}=a_1\left(x_{1i}+h_1,x_{2j},x_{3k}\right)\equiv B^{(1)}_{i+\frac{1}{2},j,k},\ a_1=a_1\left(x_{1i},x_{2j},x_{3k}\right)\equiv B^{(1)}_{i-\frac{1}{2},j,k},$$

$$a_2^{+1}=a_2\left(x_{1i},x_{2j}+h_2,x_{3k}\right)\equiv B^{(2)}_{i,j+\frac{1}{2},k}.\ a_2=a_2\left(x_{1i},x_{2j},x_{3k}\right)\equiv B^{(2)}_{i,j+\frac{1}{2},k},$$

$$a_3^{+1}=a_2\left(x_{1i},x_{2j},x_{3k}+h_3\right)\equiv B^{(3)}_{i,j,k+\frac{1}{2}}.\ a_3=a_3\left(x_{1i},x_{2j},x_{3k}\right)\equiv B^{(3)}_{i,j,k+\frac{1}{2}},$$

$$x_1\in\omega_1,\ x_2\in\omega_2,\ x_3\in\omega_3,$$

$$\omega_\alpha=\{x_\alpha=i_\alpha h_\alpha,1\le i_\alpha\le N_\alpha-1\},\quad \alpha=1,2,3,\quad \omega=\omega_1\times\omega_2\times\omega_3.$$

Предполагается, что имеет место связь между искомыми сеточными функциями уравнений (10) и (11) и сеточными функциями правых частей этих же уравнений:

$$y\left(x_{1i},x_{2j},x_{3k}\right)\equiv P_{i,j,k},\quad q\left(x_{1i},x_{2j},x_{3k}\right)\equiv B_{g\,i,j,k},$$

$$\varphi\left(x_{1i},x_{2j},x_{3k}\right)\equiv-\frac{g\rho_1}{\mu_1 h_z}\Big(0,5\left(f^n{}_{1i,j,k-1}+f^n{}_{1i,j,k}\right)k_{v\,i,j,k-0,5}-$$

$$-0,5\left(f^n{}_{1i,j,k+1}+f^n{}_{1i,j,k}\right)k_{v\,i,j,k+0,5}\Big)-\frac{g\rho_2}{\mu_2 h_z}\Big(0,5\left(f^n{}_{2\,i,j,k-1}+f^n{}_{2\,i,j,k}\right)k_{v\,i,j,k-0,5}-$$

$$-0,5\left(f^n{}_{2\,i,j,k+1}+f^n{}_{2\,i,j,k}\right)k_{v\,i,j,k+0,5}\Big)-B_{g\,i,j,k}P_{g\,i,j,k}.$$

Здесь значения относительных фазовых проницаемостей: $f^n{}_{1i,j,k-1}$, $f^n{}_{1i,j,k}$, $f^n{}_{2\,i,j,k-1}$, $f^n{}_{2i,j,k}$ входят в соответствии с равенствами (10) в функции правых частей сеточного уравнения (8) и рассчитываются на основе значений сеточной функции водонасыщенности на предыдущем *n*-м временном слое. При этом

$$P_{g\,i,j,k}=\begin{cases}P_{w\,i,j,k}-\textit{если узел находится на нагнетательной скважине;}\\ P_{o\,i,j,k}-\textit{если узел находится на эксплуатационной скважине;}\\ 0-\textit{если узел не совпадает ни с одной из скважин.}\end{cases}$$

Будем использовать смещенные сетки

$$\omega_1^+=\{x_1=i_1h_1,1\le i_1\le N_1\},\ \omega_2^+=\{x_2=i_2h_2,1\le i_2\le N_2\},\ \omega_3^+=\{x_3=i_3h_3,1\le i_3\le N_3\}$$

и скалярные произведения

$$(u,v)_{\omega_1}=\sum_{x_1\in\omega_1}u(x)v(x)h_1,\quad (u,v)_{\omega_1^+}=\sum_{x_1\in\omega_1^+}u(x)v(x)h_1,$$

$$(u,v)_{\omega_2}=\sum_{x_2\in\omega_2}u(x)v(x)h_2,\quad (u,v)_{\omega_2^+}=\sum_{x_2\in\omega_2^+}u(x)v(x)h_2,$$

$$(u,v)_{\omega_3}=\sum_{x_2\in\omega_3}u(x)v(x)h_3,\quad (u,v)_{\omega_3^+}=\sum_{x_2\in\omega_3^+}u(x)v(x)h_3,$$

$$\left(u,v\right)_1=\sum_{x_1\in\omega_1^+}\sum_{x_2\in\omega_2}\sum_{x_3\in\omega_3}u\left(x\right)v\left(x\right)h_1h_2h_3,$$

$$\left(u,v\right)_2=\sum_{x_1\in\omega_1}\sum_{x_2\in\omega_2^+}\sum_{x_3\in\omega_3}u\left(x\right)v\left(x\right)h_1h_2h_3,\left(u,v\right)_3=\sum_{x_1\in\omega_1}\sum_{x_2\in\omega_2}\sum_{x_3\in\omega_3^+}u\left(x\right)v\left(x\right)h_1h_2h_3.$$

Представим систему разностных уравнений (8), (9) в виде операторного уравнения с однородными граничными условиями, изменив соответствующим образом правую часть:

$$A\overset{o}{y}=u,$$

$$A\overset{o}{y}=-\sum_{\alpha=1}^{3}\left(a_\alpha^{+1}\overset{o}{y}_{x_\alpha}\right)_{\bar{x}_\alpha}+q\overset{o}{y},\quad x\in\omega, \tag{10}$$

$$\overset{o}{y}\left(x\right)=0,\ x\in\gamma. \tag{11}$$

Представим схему итерационного двухслойного модифицированного попеременно-треугольного метода в операторном виде:

$$\left(D+\omega R_1\right)D^{-1}\left(D+\omega R_2\right)\frac{y^{n+1}-y^n}{\tau_{n+1}}+Ay^n=f, \tag{12}$$

где операторы, входящие в уравнение (12), запишутся

$$R_1y=\sum_{\alpha=1}^{3}\left(\frac{a_\alpha}{h_\alpha}y_{\bar{x}_\alpha}+\frac{a_{\alpha x_\alpha}}{2h_\alpha}y+\frac{1}{6}qy\right), \tag{13}$$

$$R_2y=-\sum_{\alpha=1}^{3}\left(\frac{a_\alpha^{+1}}{h_\alpha}y_{x_\alpha}+\frac{a_{\alpha x_\alpha}}{2h_\alpha}y-\frac{1}{6}qy\right). \tag{14}$$

Видно, что операторы, введенные в соответствии с равенствами (13) и (14), являются сопряженными на множестве сеточных функций, обращающихся в ноль на границе сетки в соответствии с равенством (10), т. е.:

$$R_1=-R_2^*.$$

Очевидно, что

$$A=R_1+R_2.$$

Получим необходимые оценки констант, входящих в операторные неравенства [8]:

$$\delta D\le R_1+R_2,\ R_1D^{-1}R_2\le\frac{\Delta}{4}\left(R_1+R_2\right). \tag{15}$$

Сеточная функция $d(x)$, определяющая элементы диагональной матрицы D, будет построена ниже.

Рассмотрим соответствующие скалярные произведения:

$$\left(R_1D^{-1}R_2\overset{o}{y},\overset{o}{y}\right)=\left(\frac{1}{d}\sum_{\alpha=1}^{3}\left(\frac{a_\alpha^{+1}}{h_\alpha}\overset{o}{y}_{x_\alpha}+\frac{a_{\alpha x_\alpha}}{2h_\alpha}\overset{o}{y}-\frac{1}{6}q\overset{o}{y}\right),\sum_{\alpha=1}^{3}\left(\frac{a_\alpha^{+1}}{h_\alpha}\overset{o}{y}_{x_\alpha}+\frac{a_{\alpha x_\alpha}}{2h_\alpha}\overset{o}{y}-\frac{1}{6}q\overset{o}{y}\right)\right)=$$
$$=\left(\frac{1}{d}\left(\sum_{\alpha=1}^{3}\left(\frac{a_\alpha^{+1}}{h_\alpha}\overset{o}{y}_{x_\alpha}+\frac{a_{\alpha x_\alpha}}{2h_\alpha}\overset{o}{y}-\frac{1}{6}q\overset{o}{y}\right)\right)^2,1\right). \tag{16}$$

Будем использовать лемму: «Для любых чисел p_α, u_α, v_α, r_α имеет место следующее неравенство:

$$\sum_{\alpha=1}^{n}\left[p_\alpha u_\alpha+v_\alpha r_\alpha\right]^2\le\sum_{\alpha=1}^{n}\sum_{\beta=1}^{n}\varepsilon_{\alpha\beta}\left(\left|p_\alpha\right|+\chi_\alpha\left|r_\alpha\right|\right)\left(\left|p_\alpha\right|u_\alpha^2+v_\alpha^2\frac{\left|r_\alpha\right|}{\chi_\alpha}\right), \tag{17}$$

где $\varepsilon_{\alpha\beta}>0,\varepsilon_{\alpha\beta}=\frac{1}{\varepsilon_{\beta\alpha}}$, $\varepsilon_{\alpha\alpha}=1$, $\chi_\alpha>0$».

Доказательство этой леммы основывается на ε-неравенстве и здесь не приводится [7].

Положим в неравенстве (17)

$$p_\alpha=\frac{a_\alpha^{+1}}{h_\alpha},\quad u_\alpha=\overset{\circ}{y}_{x_\alpha},\quad v_\alpha=\frac{1}{h_\alpha}\overset{\circ}{y},\quad r_\alpha=\frac{a_{\alpha x_\alpha}}{2}-\frac{h_\alpha q}{6},$$

$$\varepsilon_{\alpha\beta}\left(x\right)=\frac{\dfrac{a_\beta^{+1}}{h_\beta^2}+\chi_\beta\left|\dfrac{a_{\beta x_\beta}}{2h_\beta}-\dfrac{q}{6}\right|}{\dfrac{a_\alpha^{+1}}{h_\alpha^2}+\chi_\alpha\left|\dfrac{a_{\alpha x_\alpha}}{2h_\alpha}-\dfrac{q}{6}\right|}\cdot\frac{\theta_\beta\left(x_\alpha,x_{\delta_1}\right)}{\theta_\alpha\left(x_\beta,x_{\delta_2}\right)},\quad где\ \beta=1,2,3,\quad \alpha=1,2,3,$$

$$\theta_\beta\left(x_\alpha, x_{\delta_1}\right)=\begin{cases}\theta_1\left(x_2,x_3\right), & \left(x_2,x_3\right)\in\omega_2\times\omega_3, \quad \textit{если } \beta=1;\\ \theta_2\left(x_1,x_3\right), & \left(x_1,x_3\right)\in\omega_1\times\omega_3, \quad \textit{если } \beta=2;\\ \theta_3\left(x_1,x_2\right), & \left(x_1,x_2\right)\in\omega_1\times\omega_2, \quad \textit{если } \beta=3;\end{cases}$$

$$\theta_\alpha\left(x_\beta, x_{\delta_2}\right)=\begin{cases}\theta_1\left(x_2,x_3\right), & \left(x_2,x_3\right)\in\omega_2\times\omega_3, \quad \textit{если } \alpha=1;\\ \theta_2\left(x_1,x_3\right), & \left(x_1,x_3\right)\in\omega_1\times\omega_3, \quad \textit{если } \alpha=2;\\ \theta_3\left(x_1,x_2\right), & \left(x_1,x_2\right)\in\omega_1\times\omega_2, \quad \textit{если } \alpha=3.\end{cases} \tag{18}$$

Функцию $d(x)$, соответствующую оператору D, определим так:

$$d\left(x\right)=\sum_{\alpha=1}^{3}\left(a_\alpha^{+1}+h_\alpha^2\chi_\alpha\left|\frac{a_{\alpha x_\alpha}}{2h_\alpha}-\frac{q}{6}\right|\right)\frac{\theta_\alpha}{h_\alpha^2}, \quad x\in\omega. \tag{19}$$

Из соотношений (16) и (17) получаем неравенство

$$\left(R_1D^{-1}R_2\overset{o}{y},\overset{o}{y}\right)\le\sum_{\alpha=1}^{3}\left(\frac{a_\alpha^{+1}}{\theta_\alpha}\overset{o}{y}{}_{x_\alpha}^2,1\right)+\sum_{\alpha=1}^{3}\left(\frac{1}{\theta_\alpha\chi_\alpha}\left|\frac{a_{\alpha x_\alpha}}{2h_\alpha}-\frac{q}{6}\right|\overset{o}{y}{}^2,1\right). \tag{20}$$

Заметим, что справедливо неравенство

$$\left(\frac{a_\alpha^{+1}}{\theta_\alpha}\overset{o}{y}{}_{x_\alpha}^2,1\right)\le\left(\frac{a_\alpha}{\theta_\alpha}\overset{o}{y}{}_{\bar{x}_\alpha}^2,1\right)_\alpha.$$

Из этого и соотношения (18) следует:

$$\left(R_1D^{-1}R_2\overset{o}{y},\overset{o}{y}\right)\le\sum_{\alpha=1}^{3}\left[\left(\frac{a_\alpha}{\theta_\alpha}\overset{o}{y}{}_{\bar{x}_\alpha}^2,1\right)_\alpha+\left(\frac{1}{\theta_\alpha\chi_\alpha}\left|\frac{a_{\alpha x_\alpha}}{2h_\alpha}-\frac{q}{6}\right|\overset{o}{y}{}^2,1\right)_\alpha\right]. \tag{21}$$

Будем считать, что $v^\alpha\left(x\right)$ — решение краевой задачи

$$\left(a_\alpha v_{\bar{x}_\alpha}^\alpha\right)_{x_\alpha}-\frac{q}{3}v^\alpha=-\left|\frac{a_{\alpha x_\alpha}}{2h_\alpha}-\frac{q}{6}\right|, \quad \alpha=1,2,3, \quad x_\alpha\in\omega_\alpha, \tag{22}$$

$$v^\alpha=0,\ x_\alpha=0,\ x_\alpha=l_\alpha.$$

Положим

$$c_\alpha\left(x_\beta,x_\delta\right)=\max_{x_\alpha\in\omega_\alpha}v^\alpha\left(x\right),\ x=\left(x_1,x_2,x_3\right)\in\omega, \tag{23}$$

где $\alpha=1,2,3.$

$$c_\alpha\left(x_\beta,x_\delta\right)=\begin{cases}c_1\left(x_2,x_3\right), & \left(x_2,x_3\right)\in\omega_2\times\omega_3, \quad \textit{если } \alpha=1;\\ c_2\left(x_1,x_3\right), & \left(x_1,x_3\right)\in\omega_1\times\omega_3, \quad \textit{если } \alpha=2;\\ c_3\left(x_1,x_2\right), & \left(x_1,x_2\right)\in\omega_1\times\omega_2, \quad \textit{если } \alpha=3.\end{cases}$$

Используя лемму 14, приведенную в п. 4, § 2, гл. V [8], получаем:

$$\left(\left|\frac{a_{\alpha x_\alpha}}{2h_\alpha}-\frac{q}{6}\right|\overset{o}{y}{}^2,1\right)_{\omega_\alpha}\le c_\alpha\left(\left(a_\alpha\overset{o}{y}{}_{\bar{x}_\alpha}^2+\frac{q}{3}\overset{o}{y}{}^2\right),1\right)_{\omega_\alpha^+}.$$

Умножая обе части последнего равенства на произведение сеточных функций $\theta_\alpha\chi_\alpha$ и суммируя скалярно по Декартову произведению сеток $\omega_\beta\times\omega_\delta$,

где

$$\alpha=1,2,3;$$

$$\left(\beta,\delta\right)=\begin{cases}\left(2,3\right),\text{если} & \alpha=1;\\ \left(1,3\right),\text{если} & \alpha=2;\\ \left(1,2\right),\text{если} & \alpha=3,\end{cases}$$

получаем

$$\left(\theta_\alpha\chi_\alpha\left|\frac{a_{\alpha x_\alpha}}{2h_\alpha}-\frac{q}{6}\right|\overset{o}{y}{}^2,1\right)\le\left(\theta_\alpha\chi_\alpha c_\alpha\left(a_\alpha\overset{o}{y}{}_{\bar{x}_\alpha}^2+\frac{q}{3}\overset{o}{y}{}^2\right),1\right)_\alpha. \tag{24}$$

Рассмотрим теперь другую совокупность трехточечных разностных задач:

$$\left(a_\alpha w^\alpha_{\bar{x}_\alpha}\right)_{x_\alpha} - \frac{q}{3} w^\alpha = -\frac{a^{+1}_\alpha}{h^2_\alpha},\ w^\alpha = 0,\ x_\alpha = 0,\ x_\alpha = l_\alpha,\ \alpha = 1,2,3; \quad x_\alpha \in \omega_\alpha,\ x = (x_1, x_2, x_3) \in \omega. \tag{25}$$

Пусть

$$b_\alpha\left(x_\beta, x_\delta\right) = \max_{x_\alpha \in \omega_\alpha} w^\alpha(x),\ x = (x_1, x_2, x_3) \in \omega,\ \alpha = 1,2,3, \tag{26}$$

где

$$b_\alpha\left(x_\beta, x_\delta\right) = \begin{cases} b_1(x_2, x_3), & (x_2, x_3) \in \omega_2 \times \omega_3, \quad \textit{если } \alpha = 1; \\ b_2(x_1, x_3), & (x_1, x_3) \in \omega_1 \times \omega_3, \quad \textit{если } \alpha = 2; \\ b_3(x_1, x_2), & (x_1, x_2) \in \omega_1 \times \omega_2, \quad \textit{если } \alpha = 3. \end{cases}$$

Базируясь на уже упоминавшейся лемме [8], из соотношений (25) и (26) получаем оценку вида

$$\left(\frac{a^{+1}_\alpha}{h^2_\alpha} \overset{o}{y}{}^2, 1\right)_{\omega_\alpha} \le b_\alpha \left(\left(a_\alpha \overset{o}{y}{}^2_{\bar{x}_\alpha} + \frac{q}{3} \overset{o}{y}{}^2\right), 1\right)_{\omega^+_\alpha}, \quad \alpha = 1,2,3.$$

Умножим обе части последнего равенства на сеточную функцию θ_α, суммируя скалярно по Декартову произведению сеток $\omega_\beta \times \omega_\delta$, где

$$\alpha = 1,2,3;$$

$$(\beta, \delta) = \begin{cases} (2,3), \text{ если } \alpha = 1; \\ (1,3), \text{ если } \alpha = 2; \\ (1,2), \text{ если } \alpha = 3, \end{cases}$$

получим неравенство вида

$$\left(\theta_\alpha \frac{a^{+1}_\alpha}{h^2_\alpha} \overset{o}{y}{}^2, 1\right) \le \left(\theta_\alpha b_\alpha \left(a_\alpha \overset{o}{y}{}^2_{\bar{x}_\alpha} + \frac{q}{3} \overset{o}{y}{}^2\right), 1\right)_\alpha. \tag{27}$$

Сложим (24) и (27) и с учетом формулы (19) получим

$$\left(d \overset{o}{y}{}^2, 1\right) \le \sum_{\alpha=1}^{3} \left((b_\alpha + \chi_\alpha c_\alpha) \theta_\alpha \left(a_\alpha \overset{o}{y}{}^2_{\bar{x}_\alpha} + \frac{q}{3} \overset{o}{y}{}^2\right), 1\right)_\alpha. \tag{28}$$

Построим функцию

$$\theta_\alpha\left(x_\beta, x_\delta\right) = \frac{1}{b_\alpha + \chi_\alpha c_\alpha}. \tag{29}$$

Здесь

$$\alpha = 1,2,3, \quad x_\beta \in \omega_\beta, \quad x_\delta \in \omega_\delta;$$

$$(\beta, \delta) = \begin{cases} (2,3), \text{ если } \alpha = 1; \\ (1,3), \text{ если } \alpha = 2; \\ (1,2), \text{ если } \alpha = 3. \end{cases}$$

Тогда неравенство (28) запишется в виде

$$\left(d \overset{o}{y}{}^2, 1\right) \le \left(A \overset{o}{y}, \overset{o}{y}\right).$$

Следовательно, $\delta \equiv 1$.

Рассуждая подобным способом, придем к оценке следующего вида

$$\left(\frac{1}{\theta_\alpha \chi_\alpha} \left|\frac{a_{\alpha x_\alpha}}{2h_\alpha} - \frac{q}{6}\right| \overset{o}{y}{}^2, 1\right) \le \left(\frac{c_\alpha}{\theta_\alpha \chi_\alpha} \left(a_\alpha \overset{o}{y}{}^2_{\bar{x}_\alpha} + \frac{q}{3} \overset{o}{y}{}^2\right), 1\right)_\alpha. \tag{30}$$

Неравенство (21) с учетом оценки (27) запишем

$$\left(R_1 D^{-1} R_2 \overset{o}{y}, \overset{o}{y}\right) \le \sum_{\alpha=1}^{3}\left[\left(\frac{a_\alpha}{\theta_\alpha} \overset{o}{y}{}^2_{\bar{x}_\alpha}, 1\right)_\alpha + \left(\frac{c_\alpha}{\theta_\alpha \chi_\alpha}\left(a_\alpha \overset{o}{y}{}^2_{\bar{x}_\alpha} + \frac{q}{3}\overset{o}{y}{}^2\right), 1\right)_\alpha\right]. \tag{31}$$

Предположим, что

$$\bar{q} = \max_{(x_1, x_2, x_3)\in\omega}\left\{q\left(x_1, x_2, x_3\right)\right\} \tag{32}$$

Исходя из соотношения (32), равенство (31) можно усилить и записать так:

$$\left(R_1 D^{-1} R_2 \overset{o}{y}, \overset{o}{y}\right) \le \sum_{\alpha=1}^{3}\left[\left(\frac{a_\alpha}{\theta_\alpha} \overset{o}{y}{}^2_{\bar{x}_\alpha}, 1\right)_\alpha + \left(\frac{c_\alpha}{\theta_\alpha \chi_\alpha}\left(a_\alpha \overset{o}{y}{}^2_{\bar{x}_\alpha} + \frac{\bar{q}}{3}\overset{o}{y}{}^2\right), 1\right)_\alpha\right]. \tag{33}$$

Применяя лемму 17, п. 5, § 2 гл. V [8], получаем неравенство:

$$\left(a_\alpha \overset{o}{y}{}^2_{\bar{x}_\alpha}, 1\right)_{\omega_\alpha} \le \gamma_\alpha \left(\overset{o}{y}{}^2, 1\right)_{\omega_\alpha}, \tag{34}$$

где

$\gamma_\alpha = \gamma_\alpha\left(x_\beta, x_\delta\right)$; $\alpha = 1, 2, 3$; $x_\beta \in \omega_\beta$; $x_\delta \in \omega_\delta$;

$$\left(\beta, \delta\right) = \begin{cases}\left(2, 3\right), \text{ если } \alpha = 1;\\ \left(1, 3\right), \text{ если } \alpha = 2;\\ \left(1, 2\right), \text{ если } \alpha = 3;\end{cases}$$

$$\gamma_1 = \frac{4}{h_1^2}\max\left\{a_1\left(0, x_2, x_3\right), a_1\left(l_1, x_2, x_3\right), \max_{0\le x_1\le l_1 - h_1}\left(\frac{a_1\left(x_1, x_2, x_3\right) + a_1\left(x_1 + h_1, x_2, x_3\right)}{2}\right)\right\};$$

$$\gamma_2 = \frac{4}{h_2^2}\max\left\{a_2\left(x_1, 0, x_2\right), a_1\left(x_1, l_2, x_3\right), \max_{0\le x_2\le l_2 - h_2}\left(\frac{a_2\left(x_1, x_2, x_3\right) + a_2\left(x_1, x_2 + h_2, x_3\right)}{2}\right)\right\};$$

$$\gamma_3 = \frac{4}{h_3^2}\max\left\{a_3\left(x_1, x_2, 0\right), a_3\left(x_1, x_2, l_3\right), \max_{0\le x_3\le l_3 - h_3}\left(\frac{a_3\left(x_1, x_2, x_3\right) + a_3\left(x_1, x_2, x_3 + h_3\right)}{2}\right)\right\}.$$

Опираясь на неравенство (31), имеем цепочку неравенств:

$$\left(a_\alpha \overset{o}{y}{}^2_{\bar{x}_\alpha}, 1\right)_{\omega_\alpha} \le \gamma_\alpha\left(\overset{o}{y}{}^2, 1\right)_{\omega_\alpha} = \gamma_\alpha \frac{3}{\bar{q}}\left(\frac{\bar{q}}{3}\overset{o}{y}{}^2, 1\right)_{\omega_\alpha}, \quad \alpha = 1, 2, 3. \tag{35}$$

Будем задавать постоянные величины в соответствии с равенствами:

$$k_{1\alpha} = \frac{\gamma_\alpha}{\gamma_\alpha + \frac{1}{3}\bar{q}}, \quad \alpha = 1, 2, 3. \tag{36}$$

Базируясь на соотношениях (35), (36), приходим к цепочке неравенств:

$$\begin{aligned}\left(a_\alpha \overset{o}{y}{}^2_{\bar{x}_\alpha}, 1\right)_{\omega_\alpha} &= k_{1\alpha}\left(a_\alpha \overset{o}{y}{}^2_{\bar{x}_\alpha}, 1\right)_{\omega_\alpha} + \left(1 - k_{1\alpha}\right)\left(a_\alpha \overset{o}{y}{}^2_{\bar{x}_\alpha}, 1\right)_{\omega_\alpha} \le \\ &\le k_{1\alpha}\left(a_\alpha \overset{o}{y}{}^2_{\bar{x}_\alpha}, 1\right)_{\omega_\alpha} + \left(1 - k_{1\alpha}\right)\frac{3}{\bar{q}}\gamma_\alpha\left(\frac{\bar{q}}{3}\overset{o}{y}{}^2, 1\right)_{\omega_\alpha} = \\ &= k_{1\alpha}\left(a_\alpha \overset{o}{y}{}^2_{\bar{x}_\alpha}, 1\right)_{\omega_\alpha} + k_{1\alpha}\left(\frac{\bar{q}}{3}\overset{o}{y}{}^2, 1\right)_{\omega_\alpha}, \quad \alpha = 1, 2, 3.\end{aligned} \tag{37}$$

Рассуждая аналогичным образом и учитывая неравенство (34), приходим к соотношению

$$\left(\frac{a_\alpha}{\theta_\alpha}\overset{o}{y}{}^2_{\bar{x}_\alpha}, 1\right)_\alpha \le \left(\frac{k_{1\alpha}}{\theta_\alpha}\left(a_\alpha \overset{o}{y}{}^2_{\bar{x}_\alpha} + \frac{\bar{q}}{3}\overset{o}{y}{}^2\right), 1\right)_\alpha, \quad \alpha = 1, 2, 3. \tag{38}$$

Воспользуемся для преобразования неравенства (38) соотношением (33):

$$\left(R_1 D^{-1} R_2 \overset{o}{y}, \overset{o}{y}\right) \le \sum_{\alpha=1}^{3}\left[\left(\frac{a_\alpha}{\theta_\alpha} \overset{o}{y}{}^2_{\bar{x}_\alpha}, 1\right)_\alpha + \left(\frac{c_\alpha}{\theta_\alpha \chi_\alpha}\left(a_\alpha \overset{o}{y}{}^2_{\bar{x}_\alpha} + \frac{\bar{q}}{3} \overset{o}{y}{}^2\right), 1\right)_\alpha\right] \le$$

$$\le \sum_{\alpha=1}^{3}\left[\left(\frac{k_{1\alpha}}{\theta_\alpha}\left(a_\alpha \overset{o}{y}{}^2_{\bar{x}_\alpha} + \frac{\bar{q}}{3} \overset{o}{y}{}^2\right), 1\right)_\alpha + \left(\frac{c_\alpha}{\theta_\alpha \chi_\alpha}\left(a_\alpha \overset{o}{y}{}^2_{\bar{x}_\alpha} + \frac{\bar{q}}{3} \overset{o}{y}{}^2\right), 1\right)_\alpha\right].$$

Используя соотношение (29), из последнего неравенства получаем оценку вида:

$$\left(R_1 D^{-1} R_2 \overset{o}{y}, \overset{o}{y}\right) \le \sum_{\alpha=1}^{3}\left(\left(b_\alpha + \chi_\alpha c_\alpha\right)\left(k_{1\alpha} + \frac{c_\alpha}{\chi_\alpha}\right)\left(a_\alpha \overset{o}{y}{}^2_{\bar{x}_\alpha} + \frac{\bar{q}}{3} \overset{o}{y}{}^2\right), 1\right)_\alpha \qquad (39)$$

Чтобы получить в неравенстве (39) наиболее точную оценку для скалярного произведения

$$\left(R_1 D^{-1} R_2 \overset{o}{y}, \overset{o}{y}\right),$$

необходимо найти минимум выражения

$$\left(b_\alpha + \chi_\alpha c_\alpha\right)\left(k_{1\alpha} + \frac{c_\alpha}{\chi_\alpha}\right),$$

который будет достигнут, если

$$\chi_\alpha\left(x_\beta, x_\delta\right) = \left(\frac{b_\alpha\left(x_\beta, x_\delta\right)}{k_{1\alpha}\left(x_\beta, x_\delta\right)}\right)^{\frac{1}{2}}; \ \alpha = 1,2,3; \ x_\beta \in \omega_\beta; \ x_\delta \in \omega_\delta; \qquad (40)$$

$$\left(\beta, \delta\right) = \begin{cases} \left(2,3\right), \text{ если } \alpha = 1; \\ \left(1,3\right), \text{ если } \alpha = 2; \\ \left(1,2\right), \text{ если } \alpha = 3. \end{cases}$$

Неравенство (39) примет вид

$$\left(R_1 D^{-1} R_2 \overset{o}{y}, \overset{o}{y}\right) \le \sum_{\alpha=1}^{3}\left(\left(b_\alpha + \chi_\alpha c_\alpha\right)\left(k_{1\alpha} + \frac{c_\alpha}{\chi_\alpha}\right)\left(a_\alpha \overset{o}{y}{}^2_{\bar{x}_\alpha} + \frac{\bar{q}}{3} \overset{o}{y}{}^2\right), 1\right)_\alpha .$$

Соответствующее выражение для определения функции $d(x)$ запишется следующим образом:

$$d\left(x\right) = \sum_{\alpha=1}^{3}\left(\frac{a_\alpha^{+1}}{h_\alpha^2} + \left(\frac{b_\alpha}{k_{1\alpha}}\right)^{\frac{1}{2}}\left|\frac{a_{\alpha x_\alpha}}{2h_\alpha} - \frac{q}{6}\right|\right)\left(b_\alpha + c_\alpha\left(\frac{b_\alpha}{k_{1\alpha}}\right)^{\frac{1}{2}}\right)^{-1}. \qquad (41)$$

Из соотношения (37) и неравенства (36) получаем оценку для параметра Δ:

$$\Delta = \max_{\alpha=1,2,3}\left[\max_{x_\beta \in \omega_\beta, x_\delta \in \omega_\delta}\left(\left(b_\alpha\left(x_\beta, x_\delta\right) k_{1\alpha}\left(x_\beta, x_\delta\right)\right)^{\frac{1}{2}} + c_\alpha\left(x_\beta, x_\delta\right)\right)^2\right],$$

$$\alpha = 1,2,3, \quad x_\beta \in \omega_\beta, \quad x_\delta \in \omega_\delta, \qquad (42)$$

$$\left(\beta, \delta\right) = \begin{cases} \left(2,3\right), \text{ если } \alpha = 1 \\ \left(1,3\right), \text{ если } \alpha = 2 \\ \left(1,2\right), \text{ если } \alpha = 3. \end{cases}$$

Ранее было показано, что имеет место оценка $\delta = 1$. Таким образом, определить параметр ω_0 можно с помощью следующего равенства:

$$\omega_0 = \frac{2}{\sqrt{\Delta}}. \qquad (43)$$

Поскольку сеточный оператор A, входящий в операторную постановку задачи, задаваемую равенствами (8), (9), является самосопряженным, то в итерационной формуле (12) итерационные параметры τ_{n+1}, $n = 0,1,\ldots n_0(\varepsilon) - 1$ следует для ускорения сходимости выбирать совпадающими с чебышевским набором. Тогда для числа итераций $n_0(\varepsilon)$,

требуемого для достижения заданной точности ε, справедлива оценка [8]:

$$n_0(\varepsilon) = \frac{\sqrt[4]{\Delta}\ln\left(\frac{2}{\varepsilon}\right)}{2\sqrt{2}}. \quad (44)$$

Если $N_0 = \max\{N_1, N_2, N_3\}$,

где максимум берется по числу узлов сетки по всем трем координатным направлениям, то нетрудно показать, что оценка (44) принимает вид:

$$n_0(\varepsilon) = O\left(\sqrt{N_0}\ln\left(\frac{2}{\varepsilon}\right)\right). \quad (45)$$

4. Результаты численных экспериментов. Для того чтобы построить модельную задачу, будем ориентироваться на среднюю проницаемость нефтеносных пластов, порядок которой составляет 10^{-12} м^2. Это значение взято в качестве базовой проницаемости. Далее базовая проницаемость умножается на неоднородный коэффициент проницаемости, показанный на рис. 1 (сгенерирован случайно из диапазона 0,01–100 для области 150×150 м). Таким образом, разброс значений проницаемости составляет 4 порядка, что соответствует наиболее сложным с вычислительной точки зрения постановкам задач [9]–[12], на обусловленность которых влияют как количество используемых узлов сетки, так и разброс коэффициентов сеточных уравнений.

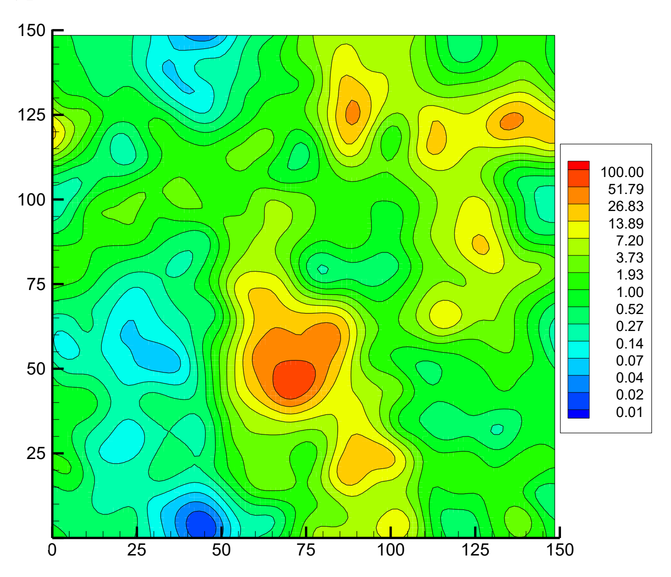


Рис. 1. Распределение проницаемостей пласта

Будем считать, что:

— толщина пласта — 10 м;

— горизонтальные размеры области — 150×150 м;

— граничные условия — непроницаемые стенки.

Зададим суточные дебиты скважин, в одну из которых (нагнетательную) вода закачивается с дебитом 300 м^3/сутки, а из другой (эксплуатационной) — выкачивается нефтеводоносная смесь с отрицательным дебитом 300 м^3/сутки. Проницаемость пласта в зависимости от вертикальной координаты не меняется. Исходные данные для наглядности представлены в табл. 1.

Таблица 1

Исходные данные к модельной задаче

Наименование параметра	Значение	Единицы измерения
Длина области по направлению OX	150	м
Длина области по направлению OY	150	м
Мощность пласта	10	м
Пористость	0,2	
Проницаемость	В соответствии с рис. 1	
Начальная водонасыщенность	0,1	
Дебит на нагнетательной скважине	300	м^3/сут
Дебит на эксплуатационной скважине	–300	м^3/сут

Использовалась пространственно-трехмерная сетка с общим количеством шагов: 300×300×20, шаг по времени составлял 0,003–0,005 сут. Сеточное уравнение для функции давления решалось двумя методами: Зейделя (МЗ) и методом верхней релаксации с шахматной упорядоченностью узлов (МВРШУ) [1], а также построенным в данной работе усовершенствованным МПТМ.

На рис. 2 представлено пространственное распределение функции водонасыщенности в нефтеводоносном пласте в зависимости от горизонтальных координат по истечении 20 и 50 суток, а на рис. 3 — распределение давлений. Следует отметить, что полученные результаты удовлетворяют закону материального баланса на дискретном уровне и качественно согласуются с результатами моделирования подобной задачи другими авторами [9].

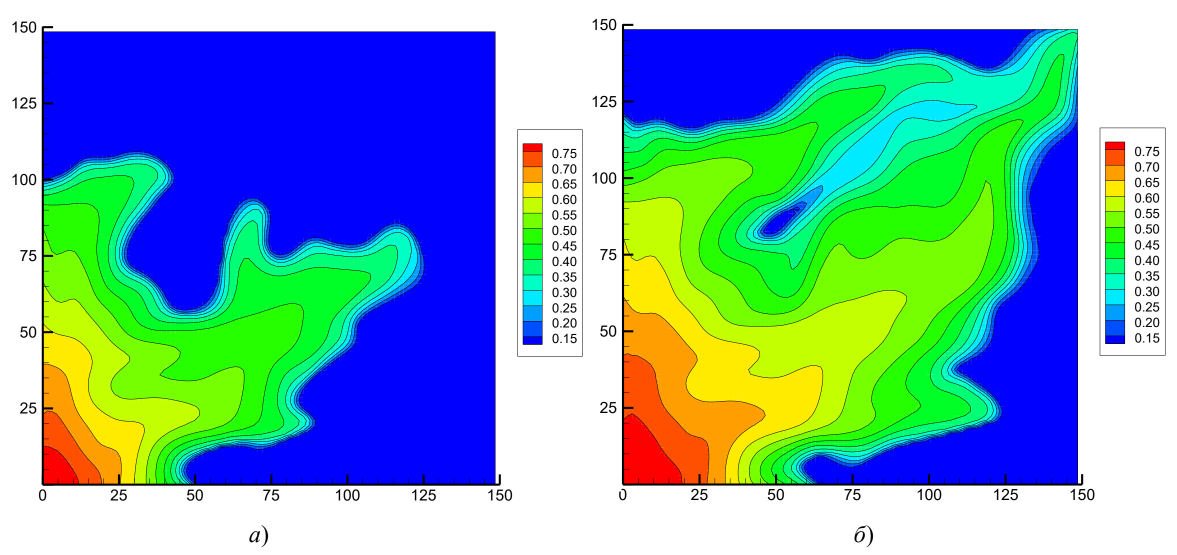


Рис. 2. Распределение функции водонасыщенности: через 20 суток (*а*); через 50 суток (*б*)

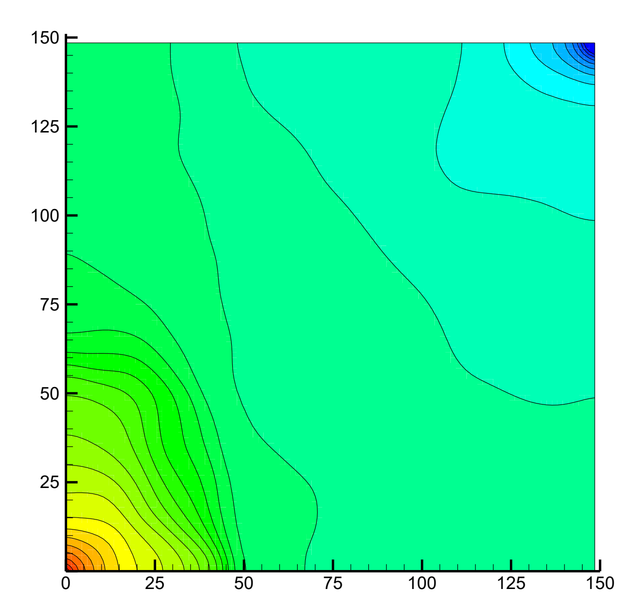


Рис. 3. Распределение функции давления через 50 суток
(изменяется в соответствии с палитрой от 100 атмосфер до 250 атмосфер)

Результаты численных экспериментов демонстрируют значительное преимущество построенного варианта МПТМ по сравнению с широко используемыми методами — число итераций сокращается в 10–70 раз (табл. 2).

Таблица 2

Количество итераций, требуемое для перехода на новый слой

Номер временного слоя	Метод решения сеточных уравнений для функции давления		
	МЗ	МВРШУ	МПТМ
1	37535	7232	752
2	23347	3243	314
3	14138	2172	196
4	13190	1918	188
5	12932	1863	184

Заключение. Для 3D-модели фильтрации двухфазной жидкости выполнена ее дискретизация на основе метода, явного по насыщенности и неявного по давлению. Для полученной системы сеточных 3D-уравнений построен вариант модифицированного попеременно-треугольного метода (МПТМ). Он учитывает наличие δ-образных источников (скважин) как в структуре оператора-предобусловливателя, так и в оценке энергетической постоянной, определяющей минимально необходимое число итераций при использовании чебышевского набора итерационных параметров. Данный вариант МПТМ применен для решения модельной пространственно-трехмерной задачи в пласте с существенно (на 4 порядка) изменяющейся проницаемостью на сетках, включающих до 200 000 узлов. В сравнении с другими методами данный вариант МПТМ требует меньшего числа итераций (в 10–70 раз). Таким образом, его можно рассматривать как базовый итерационный метод в алгоритме типа *IMPES* — неявном по давлению и явном по насыщенности.

Библиографический список

1. Азиз, Х. Математическое моделирование пластовых систем / Х. Азиз, Э. Сеттари. — Москва ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2004. — 416 с.

2. Коновалов, А. Н. Задачи фильтрации многофазной несжимаемой жидкости / А. Н. Коновалов. — Новосибирск : Наука, 1988. — 166 с.

3. Вабищевич, П. Н. Явно-неявные вычислительные алгоритмы для задач многофазной фильтрации / П. Н. Вабищевич // Математическое моделирование. — 2010. — Т. 22, № 4. — 118–128.

4. Сухинов, А. И. Модифицированный попеременно-треугольный метод для задач теплопроводности и фильтрации / А. И. Сухинов // Вычислительные системы и алгоритмы. — Ростов-на-Дону : Ростовский государственный университет, 1984. — С. 52–59.

5. Сухинов, А. И. Двумерные схемы расщепления и некоторые их приложения / А. И. Сухинов // Москва : МАКС Пресс. — 2005. — 408 с.

6. Сухинов, А. И. Модификация метода минимальных поправок для решения сеточных уравнений с несамосопряженным оператором // А. И. Сухинов, А. Е. Чистяков, А. В. Шишеня // Известия Юж. федер. ун-та. Техн. науки. —2013. — № 4. — С. 194–202.

7. Сухинов, А. И. Адаптивный попеременно-треугольный метод для решения сеточных уравнений с несамосопряженным оператором / А. И. Сухинов, А. Е. Чистяков // Математическое моделирование. — 2012. — Т. 24, № 1. — С. 3–20.

8. Самарский, А. А. Методы решения сеточных уравнений // А. А. Самарский, Е. С. Николаев. — Москва : Наука, 1978. — 592 с.

9. Two-Phase Porous Media Flow Simulation on Hybrid Cluster / M. Trapeznikova [et al.] // Lecture Notes in Computer Science. — 2012. — № 7116. — P. 644–651.

10. Бервено, Е. В. Фильтрация двухфазной жидкости в неоднородной среде на компьютерах с распределенной памятью / Е. В. Бервено, А. А. Калинкин, Ю. М. Лаевский // Вестник Томск. гос. ун-та. Математика и механика. — 2014. — № 4 (30). — С. 57–62.

11. Лаевский, Ю. М. Об одном вычислительном алгоритме решения уравнений Баклея — Леверетта / Ю. М. Лаевский, С. А. Литвиненко // Сибирский журн. индустр. матем. — 2013. — Т. 16. — № 3. — С. 106–115.

12. Mathematical modeling of flows in porous media / V. R. Dushin [et al.] // WSEAS Transactions on Fluid Mechanics. — 2014. — Vol. 9. — P. 166–130.

References

1. Aziz, K., Settary, E. Matematicheskoe modelirovanie plastovykh system. [Mathematical modeling of tabular systems.] Moscow; Izhevsk: Institute of Computer Science, 2004, 416 p. (in Russian).

2. Konovalov, A.N. Zadachi fil'tratsii mnogofaznoy neszhimaemoy zhidkosti. [Filtering problems of multiple incom-

pressible fluids.] Novosibirsk: Nauka, 1988, 166 p. (in Russian).

3. Vabishchevich, P.N. Yavno-neyavnye vychislitel'nye algoritmy dlya zadach mnogofaznoy fil'tratsii. [Explicit-implicit numerical algorithms for porous media multiphase flow problems.] Mathematical Models and Computer Simulations, 2010, vol. 22, no. 4, pp. 118–128 (in Russian).

4. Sukhinov, A.I. Modifitsirovannyy poperemenno-treugol'nyy metod dlya zadach teploprovodnosti i fil'tratsii. [Modified alternating triangular method for heat conduction problems and filtering.] Vychislitel'nye sistemy i algoritmy. [Computation systems and algorithms.] Rostov-on-Don: Rostov State University, 1984, pp. 52–59 (in Russian).

5. Sukhinov, A.I. Dvumernye skhemy rasshchepleniya i nekotorye ikh prilozheniya. [Two-dimensional splitting schemes and some of their applications.] Moscow: MAKS Press, 2005, 408 p. (in Russian).

6. Sukhinov, A.I., Chistyakov, A.E., Shishenya, A.V. Modifikatsiya metoda minimal'nykh popravok dlya resheniya setochnykh uravneniy s nesamosopryazhennym operatorom. [Modification of minimal residuals iterative method for solving grid equations with nonselfadjoint operators.] Izvestiya SFedU. Engineering Sciences, 2013, no. 4,pp. 194–202 (in Russian).

7. Sukhinov, A.I., Chistyakov, A.E. Adaptivnyy poperemenno-treugol'nyy metod dlya resheniya setochnykh uravneniy s nesamosopryazhennym operatorom. [Adaptive analog-SSOR iterative method for solving grid equations with non-selfadjoint operators.] Mathematical Models and Computer Simulations, 2012, vol. 24, no. 1, pp. 3–20 (in Russian).

8. Samarsky, A.A., Nikolaev, E.S. Metody resheniya setochnykh uravneniy. [Solution methods of finite-difference equations.] Moscow: Nauka, 1978, 592 p. (in Russian).

9. Trapeznikova, M., et al. Two-Phase Porous Media Flow Simulation on Hybrid Cluster. Lecture Notes in Computer Science, 2012, no. 7116, pp. 644–651.

10. Berveno, E.V., Kalinkin, A.A., Laevskii, Y.M. Fil'tratsiya dvukhfaznoy zhidkosti v neodnorodnoy srede na komp'yuterakh s raspredelennoy pamyat'yu. [Two-phase fluid filtration in nonuniform media on clusters.] Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics, 2014, no. 4 (30), pp. 57–62 (in Russian).

11. Laevskii, Y.M., Litvinenko, S.A. Ob odnom vychislitel'nom algoritme resheniya uravneniy Bakleya — Leveretta. [On a numerical algorithm for solving the Backley-Laverett equations.] Journal of Applied and Industrial Mathematics, 2013, vol. 16, no. 3, pp. 106–115 (in Russian).

12. Dushin, V.R., et al. Mathematical modeling of flows in porous media. WSEAS Transactions on Fluid Mechanics, 2014, vol. 9, pp. 166–130.

Поступила в редакцию 02.12.2015
Сдана в редакцию 02.12.2015
Запланирована в номер 22.01.2016

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 621.317.6 DOI 10.12737/18132

Численное моделирование эксперимента по импульсному воздействию на пьезоэлектрический генератор стекового типа[*]

А. Н. Соловьев[1], Ле Ван Зыонг[2], В. А. Акопьян[3], Е. В. Рожков[4], В. А. Чебаненко[5]**

[1, 2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[1, 3, 4, 5] Южный федеральный университет, ИММ и КН им. И. И. Воровича, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[1] Южный научный центр РАН, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация.

Numerical simulation of the experiment on pulsed excitation of stack type piezoelectric generator[***]

A. N. Solovyev[1], Le Van Duong[2], V. A. Akopyan[3], E. V. Rozhkov[4], V. A. Chebanenko[5]**

[1, 2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[1, 3, 4, 5] Southern Federal University, Research Institute for Mechanics and Applied Mathematics after I.I. Vorovich, Rostov-on-Don, Russian Federation
[1] Southern Scientific Center of RAS, Rostov-on-Don, Russian Federation.

Описаны результаты численного моделирования натурного эксперимента низкочастотного импульсного воздействия на пьезоэлектрический генератор (ПЭГ) стекового типа для устройства накопления энергии. ПЭГ представляет собой многослойный осесимметричный пьезокерамический пакет. Разработана конечно-элементная модель устройства в *ANSYS* и проанализирована аналитическая упрощенная одномерная модель. Исследована зависимость выходного напряжения от величины активной нагрузки при гармоническом и нестационарном механическом воздействии на ПЭГ. Сопоставление экспериментальных результатов и численного расчета показало их хорошую сходимость, что позволяет использовать разработанные численные модели для оптимизации конструкции ПЭГ при заданных частоте внешнего воздействия и величине активного сопротивления внешней электрической цепи. Кроме того, установлено, что частотная зависимость выходного напряжения ПЭГ осевого типа имеет сложный характер, зависящий как от уровня сжимающей импульсной нагрузки и величины пьезомодуля материала чувствительного элемента ПЭГ, так и от электрического сопротивления нагрузки.

Ключевые слова: многослойный пьезоэлектрический генератор, выходные характеристики, физический эксперимент, конечно-элементный расчет, упрощенная модель.

The numerical modeling results of the full-scale experiment with low-frequency pulse excitation of the stack-type piezoelectric generator (PEG) for the energy storage device are described. PEG is a multilayer axisymmetric piezoceramic package. The dependence of the output voltage on the active load rate under the harmonic and non-stationary mechanical action of the PEG is studied. A finite element device model is developed in *ANSYS*, and a simplified one-dimensional analytical model is analyzed. The experimental results-to-numerical calculation correlation has shown their good convergence which allows using the analyzed numerical models to optimize the PEG design at the given external action frequency and active resistance value of the external electric circuit. In addition, it is found that the frequency dependence of the output voltage of the axial-type PEG is of a complex nature depending both on the compressive pulse loading level and the piezoelectric modulus value of the PEG sensitive element, and on the electrical load resistance.

Keywords: multilayered piezoelectric generator, output characteristics, physical experiment, finite element calculation, simplified model.

Введение. В последние годы получили развитие исследования, посвященные разработке пьезоэлектрических преобразователей механической энергии колебаний объектов в электрическую. Наиболее известны пьезоэлектрические преобразователи энергии двух конфигураций: осевого (стекового) и кантилеверного типа, которые имеют неограниченный срок эксплуатации, если внешние механические и температурные воздействия не приводят к необратимому уменьшению поляризации их активных элементов или их разрушению [1–3]. Большинство из этих работ посвя-

[*] Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 13-01-00943, 13-08-00754) и Южного федерального университета (тема № 213.01-2014/03ВГ).
[**] E-mail: solovievarc@gmail.com, vchebanenko@sfedu.ru
[***] The research is done with the financial support from RFFI (grants nos. 13-01-00943, 13-08-00754) and Southern Federal University (theme no. 213.01-2014/03ВГ).

щены изучению характеристик пьезоэлектрических генераторов (ПЭГ) кантилеверного типа («мода колебаний d_{31}»). ПЭГ осевого типа исследованы в меньшей степени. В частности, известны работы, в которых приведены результаты теоретических исследований характеристик ПЭГ, работающих на «продольной моде d_{33} колебаний» [3, 4]. Работы [4–7] посвящены построению моделей ПЭГ на основе колебаний механической системы с сосредоточенными параметрами. Использование таких систем является удобным модельным подходом, так как позволяет получить аналитические зависимости между выходными параметрами ПЭГ (потенциалом, мощностью и т.п.) и электрическими, механическими характеристиками и сопротивлением внешней электрической цепи, однако, как показано в [8] диапазон их применения весьма ограничен. Более полные результаты исследований многослойных ПЭГ осевого типа приведены также в других работах [10, 11]. В них описаны результаты исследований характеристик ПЭГ, как осевого, так и кантилеверного типов. В [10] приведены интересные результаты температурных зависимостей параметров ПЭГ с чувствительным элементом (ЧЭ) из сегнетомягкой пьезокерамики ПКР–46. К сожалению, константы этого состава пьезокерамики не приведены, а это не позволяет провести сравнительный анализ достоверности измеренных параметров ПЭГ с известными, описанными, например, в [9]. В обзоре [11], опубликованном позднее, описаны области применения маломощных ПЭГ в основном кантилеверного типа с присоединенной массой. Также приведены только общие данные о разработанных за рубежом ПЭГ осевого типа, в которых используется механическая энергия при движении человека, т.е. в режиме циклических нагрузок. Более подробных данных о результатах исследований таких ПЭГ, к сожалению, не приведено. Выбор импульсного режима нагружения обусловлен областью применения ПЭГ осевого типа в качестве перспективных автономных источников энергии, преобразующих механическую энергию периодических воздействий из внешней среды, в том числе не гармонических, в электрическую. В частности, эти ПЭГ могут быть использованы для преобразования механической энергии колебаний рельсов железнодорожного транспорта или дорожного полотна автодороги в электрическую энергию.

Приведенный выше краткий анализ известных работ показал, что задача создания ПЭГ осевого типа большой мощности с эффективными выходными параметрами при действии импульсных нагрузок в полном объеме пока не решена, хотя и достаточно актуальна. Авторами получены экспериментальные и численные результаты исследований временных зависимостей выходных характеристик многослойного пьезоэлектрического генератора осевого типа от величины импульсных механических сжимающих напряжений при различных значениях электрического сопротивления нагрузки.

Объект исследования и методика эксперимента. Приведем результаты исследований характеристик одной модели многослойного ПЭГ стекового типа. Его ЧЭ состоит из 11 параллельно соединенных пьезоэлементов (ПЭ) дискового типа каждый толщиной 1 мм с внешним и внутренним диаметром 18 и 8 мм, соответственно. Общая высота ЧЭ составляет 11,3 мм, а общая электрическая емкость 20,22 нФ. При этом каждый из ПЭ поляризован по толщине, в качестве материала ЧЭ была использована пьезокерамика ЦТС-19, материальные константы которой приведены в таблице 1.

Таблица 1

Материальные константы пьезокерамики ЦТС-19:

C_{11}^E, ГПа	C_{12}^E, ГПа	C_{13}^E, ГПа	C_{33}^E, ГПа	C_{44}^E, ГПа	e_{31}, Кл/м^2	e_{33}, Кл/м^2	e_{15}, Кл/м^2	$\varepsilon_{11}/\varepsilon_0$ -	$\varepsilon_{33}/\varepsilon_0$ -
109	61	54	93	24	-4.9	14.9	10.6	820	840

Испытание ПЭГ производились на лабораторной установке импульсного нагружения ПЭГ, работающих на продольных колебаниях. Структурная схема установки представлена на рис. 1.

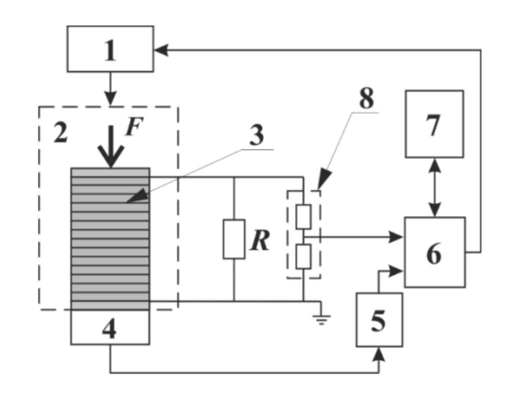


Рис. 1. Структурная схема испытательного стенда. 1 — частотный преобразователь; 2 — нагружающий модуль; 3 — испытуемый образец многослойного пьезопреобразователя (ПЭГ осевого типа); 4 — тензометрический динамометр; 5 — тензоусилитель; 6 — АЦП/ЦАП; 7 — персональный компьютер с установленным ПО PowerGraph; 8 — делитель напряжения; *R* — сопротивление электрической нагрузки

На рис. 2 приведена фотография нагружающего модуля испытательной установки, размещенной на общем основании, справа вверху — фотография ЧЭ (аппаратная часть стенда не показана).

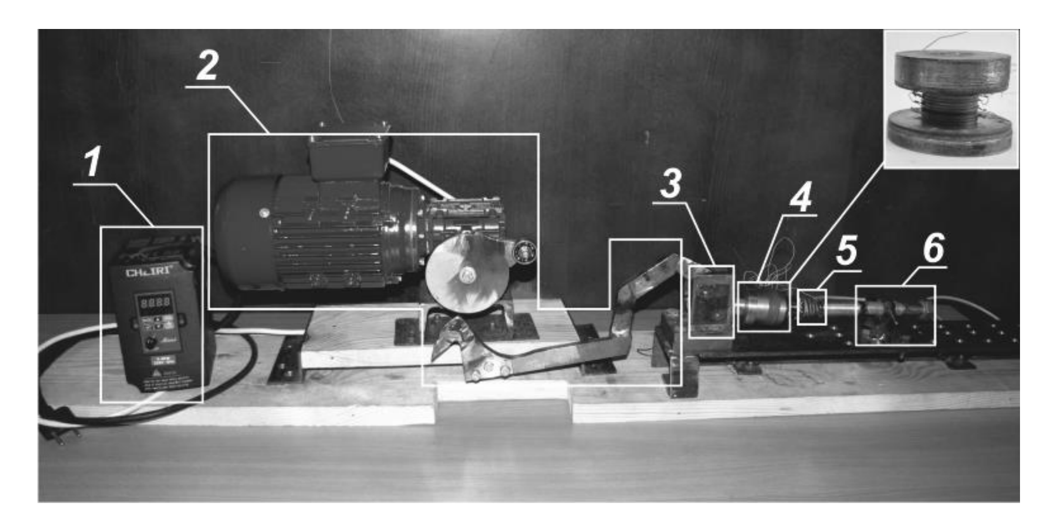


Рис. 2. Фотография лабораторной силовой части испытательной установки для определения характеристик ПЭГ осевого типа. 1 — частотный преобразователь, задающий частоту вращения двигателя от 10 до 1400 об/мин; 2 — двигатель с редуктором и эксцентриковым диском, и шатуном; 3 — механический рычажный усилитель изменения сжимающего усилия с коэффициентом преобразования 50; 4 — испытуемый образец ПЭГ; 5 — тензометрический динамометр; 6 — опорный кронштейн

Образец подвергался механическому циклическому нагружению при сжимающей импульсной силе с амплитудой от 1 кН и до 4 кН. Для каждого цикла сжимающего усилия, измеряемого с помощью динамометра, регистрировались временные зависимости величины сжимающей силы и выходного напряжения пьезогенератора при различных дискретных значениях нагрузочного сопротивления *R* от 10 кОм до 22 мОм. Регистрация временных зависимостей характеристик ПЭГ проводилась с учетом влияния сопротивления нагрузки на форму импульсов выходного напряжения ПЭГ. Такое влияние характеризуется «степенью неискаженности передачи электрического сигнала», а в нашем случае пьезоэлектрического отклика ЧЭ. Как известно [12], режим неискаженной передачи электрического импульса на регистратор сигнала определяется соотношением

$$RC \geq \tau ,$$

где τ — длительность импульса сжимающего усилия; *R* — сопротивление электрической нагрузки; *C* — электрическая емкость активного элемента ПЭГ.

Результаты экспериментальных измерений. По результатам экспериментальных измерений получены сопряженные временные зависимости силового механического воздействия и выходного электрического напряжения испытуемой модели ПЭГ от величины механического усилия и электрического нагрузочного сопротивления *R*.

На рис. 3 показаны сопряженные временные зависимости воздействующего сжимающего механического импульса силой амплитудой до 3,1 кН (кривая 4) и соответствующих пьезоэлектрических откликов на выходе ПЭГ при различных значениях сопротивлениях нагрузки *R*: 0,374; 2,572 и 22,77 МОм (кривые 1, 2 и 3).

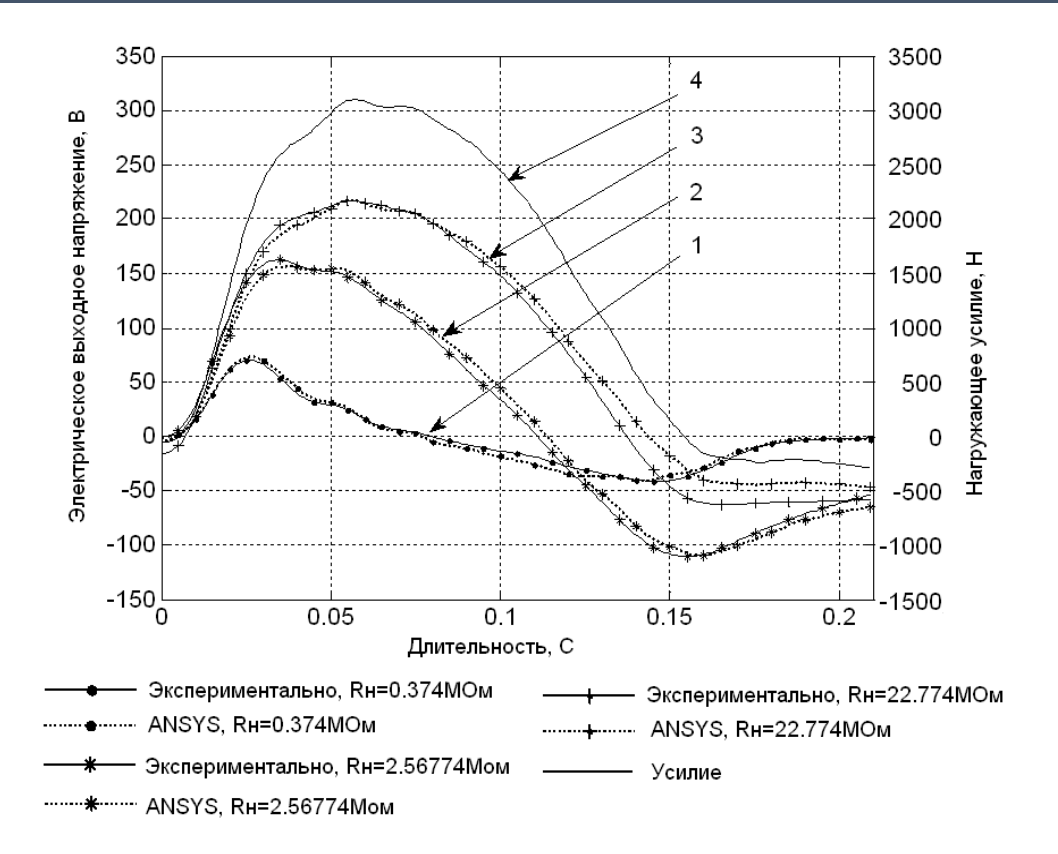


Рис. 3. Временные зависимости воздействующего сжимающего механического импульса величиной силы амплитудой до 3,1 кН (кривая 4) и соответствующих пьезоэлектрических откликов на выходе ПЭГ при различных значениях сопротивлениях нагрузки R: 0,374; 2,572 и 22,77 МОм (кривые 1, 2 и 3) соответственно, полученные из физического эксперимента (сплошные линии) и численного конечно-элементного расчета (пунктирные линии)

Сравнение форм сигналов пьезоэлектрического отклика при различных значениях R (кривые 1, 2, 3) и импульса усилия сжатия (кривая 4) показало, что с ростом R формы выходного напряжения стремятся к форме возбуждающего импульса механического напряжения.

Конечно-элементное моделирование. В *ANSYS* была построена осесимметричная конечно-элементная модель ПЭГ (рис. 4), адекватная физической модели, рассмотренной выше.

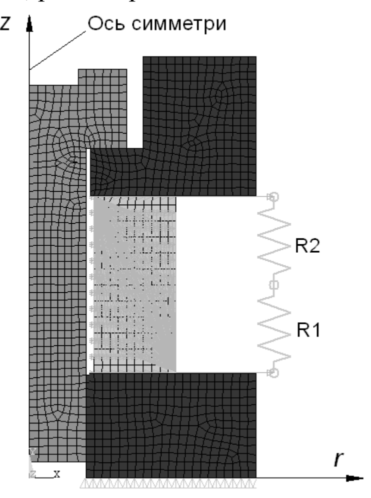


Рис. 4. Осесимметричная конечно-элементная модель ПЭГ с активной нагрузкой

На первом этапе было проведено численное исследование по выбору шага интегрирования по времени уравнений МКЭ по схеме Ньюмарка для нестационарной задачи, в результате которого он был выбран равным 0,2 мкс. При этом результаты зависимости выходного напряжения от времени близки к результатам физического эксперимента (рис. 3, кривые 1–3).

Далее была решена статическая задача для случая сжимающего усилия, воздействующего на ЧЭ ПЭГ равного 3,1 кН, в результате которого было получено значение выходного напряжения V_0, равное 722 В. Проведенная серия

нестационарных расчетов для различных значений величины R активной нагрузки при импульсном нагружении показала, что при возрастании R выходное напряжение стремится к форме напряжения для разомкнутой цепи, максимальное значение которого совпадает с V_0.

Далее были проведены расчеты в *ANSYS*, по результатам которых были получены зависимости выходного напряжения от времени с изменением сжимающей нагрузки на участке от 0 до 0,21 с. при R равном 0,374; 2,572 и 22,77 МОм. Результаты этих расчетов отражены на графике временной зависимости выходного напряжения, полученной из физического эксперимента (рис. 3). Сравнение результатов расчетов и эксперимента в этих случаях показывает достаточно хорошее их совпадение. Так как скорость нагружения ЧЭ ПЭГ достаточно мала по сравнению со скоростью упругих волновых процессов, то численное решение задачи соответствуют квазистатической постановке.

Следующий этап численного исследования связан с анализом частотной зависимости выходного напряжения ПЭГ при гармоническом возбуждении колебаний силой с амплитудой 3 кН. Эти расчеты показали, что при величине активного сопротивления 22 МОм и выше, значение выходного потенциала достигает некоторого предельного значения, начиная с частоты колебаний 0,2 Гц, в широком частотном диапазоне до первого резонанса.

Однако это не означает, что при этих значениях частоты и сопротивлении нагрузки можно на выходе достигнуть максимума выходной мощности ПЭГ. Авторами ранее было доказано, что зависимости выходного напряжения и выходной мощности от скорости механического нагружения существенно отличаются, во всяком случае в диапазоне скоростей до 4,1 кН/с [13]. Поэтому для более детального анализа этой особенности возникла необходимость расчета выходных характеристик ПЭГ в достаточно широком диапазоне скоростей нагружения. Ниже приведены результаты такого расчета с помощью аппроксимации нагрузки рядом Фурье на основе упрощённой электромеханической модели многослойного ПЭГ [14].

Предполагается, что генератор возбуждается осевым сжимающим нагружением $p(t)$ на частотах, гораздо меньших собственной резонансной частоты, что в свою очередь позволяет описать динамику системы с электромеханической связью уравнением первого порядка. Если к ПЭГ, состоящему из N слоев, поляризованных по толщине, параллельно подключено сопротивление нагрузки R, то определяющее уравнение, описывающие систему выглядит следующим образом

$$\sum_{i=1}^{N} \frac{d}{dt}\left(\int_{A_i} \cdot D n dA_i \right) = \frac{v(t)}{R}, \tag{1}$$

где $v(t)$ — напряжение на резисторе; D — вектор электрического смещения; n — вектор нормали поверхности электрода; A_i — площадь поверхности электрода i-го слоя. Представим вектор электрического смещения в виде:

$$D_i = d_{ijk} T_{ij} + \varepsilon_{ij}^{T} E_j . \tag{2}$$

Подставив (2) в (1), получим уравнение (3), описывающее динамику системы:

$$C_p^{eq} \dot{v}(t) + \frac{1}{R} v(t) = d_{33}^{eff} A \dot{p}(t), \tag{3}$$

$$C_p^{eq} = N\lambda \varepsilon_{33}^{T} A / h,$$

$$d_{33}^{eff} = N\mu d_{33},$$

где C_p^{eq} — эквивалентная емкость; h — толщина одного слоя ПЭГ; d_{33}^{eff} — эффективный пьезомодуль; λ и μ — эмпирические константы, введённые в силу различия между моноблочной и многослойной конфигурациями ПЭГ, а также эффектов, накладываемых технологией производства многослойных ПГ.

В случае, если нагружение обладает произвольной формой, как например, на рис. 3, то амплитудные значения механической нагрузки $p(t)$ можно представить набором дискретных значений, а затем интерполировать с помощью рядов Фурье:

$$p(t) \cong m_0 + \sum_{k=1}^{N} \left[m_k \cos\left(k \frac{2\pi t}{T} \right) + n_k \sin\left(k \frac{2\pi t}{T} \right) \right], \tag{4}$$

где m_0 — среднее значение; T — длительность нагружения; m_k, n_k — коэффициенты Фурье:

$$m_0 = \frac{1}{T}\int_0^T p(t)dt, \quad m_k = \frac{2}{T}\int_0^T p(t)\cos\left(k \frac{2\pi t}{T} \right) dt, \quad n_k = \frac{2}{T}\int_0^T p(t)\sin\left(k \frac{2\pi t}{T} \right) dt. \tag{5}$$

Затем полученное приближение (4) можно подставить в уравнение (3) и решить численно, например, методом Рунге-Кутта. Результаты численного моделирования с использованием одномерной модели, приведённые на рис. 5, показали высокую сходимость с результатами КЭ расчета, приведённого на рис. 3, во всяком случае в диапазоне низких частот колебаний ПЭГ стековой конфигурации. Однако, объем вычислений в последнем случае меньше, чем при

конечно-элементном моделировании. При расчете зависимости выходного напряжения ПЭГ при частоте импульсного воздействия ниже 0,2 Гц и сопротивлении нагрузки до 22 МОм можно получить выходное напряжение не более 100 В. Однако, расчет выходной мощности ПЭГ при указанной выше скорости механического нагружения составляет всего 0.05 мВт в случае сопротивления нагрузке 22 МОм, а при сопротивлении 0.374 МОм можно достичь существенно большей выходной мощности, равно при прочих равных условиях 8 мВт.

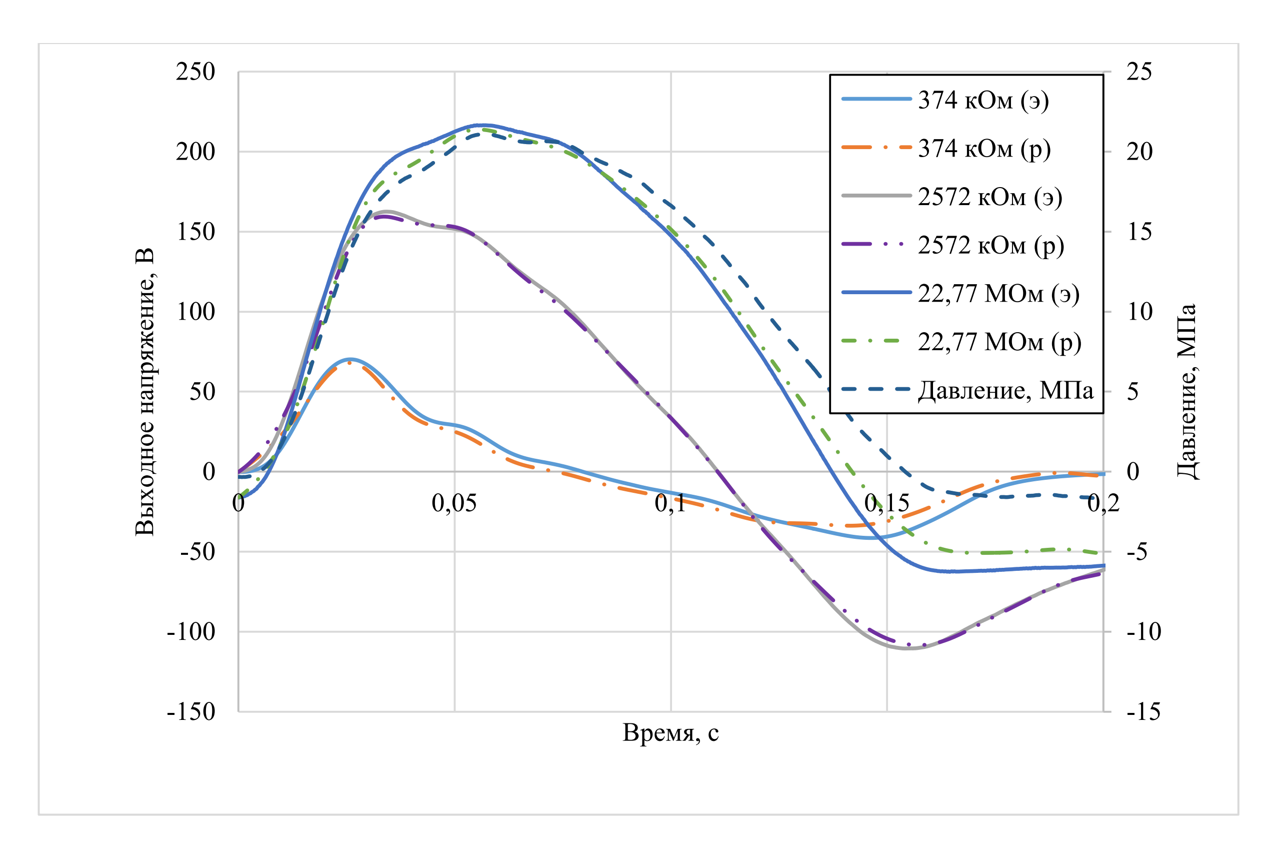


Рис. 5. Результаты численного расчета выходных характеристик ПЭГ с помощью аппроксимации механической нагрузки рядом Фурье: (э) — эксперимент, (р) — расчёт

Выводы.

1. Разработана методика и изготовлена лабораторная установка для проведения экспериментальных измерений параметров ПЭГ при их механическом импульсном нагружении.
2. Разработана конечно-элементная модель устройства в *ANSYS* и проанализирована аналитическая упрощенная одномерная модель.
3. Установлено, что временные зависимости воздействующего сжимающего механического импульса и соответствующих пьезоэлектрических откликов на выходе ПЭГ при различных значениях сопротивлениях нагрузки, полученные из физического эксперимента и численного, как конечно-элементного, так и аналитического расчета показывает достаточно хорошее их совпадение.
4. Сравнение форм сигналов пьезоэлектрического отклика при увеличении *R* (кривые 1, 2, 3 на рис. 3) и импульсов усилия сжатия (кривая 4, рис. 3) показало, что с ростом *R* формы выходного напряжения стремятся к форме возбуждающего импульса механического напряжения.
5. Показано, что режим неискаженной передачи пьезоэлектрического отклика ПЭГ стекового типа достигается при электрическом сопротивлении нагрузки выше 22 МОм для данного ПЭГ. Результаты КЭ расчета выходных характеристик ПЭГ исследованного типа подтвердили достоверность этого вывода.
6. Установлено, что частотная зависимость выходного напряжения ПЭГ осевого типа имеет сложный характер, зависящий как от уровня сжимающей импульсной нагрузки и величины пьезомодуля d_{33} материала чувствительного элемента ПЭГ, так и от электрического сопротивления нагрузки.

Библиографический список

1. Erturk, A. Piezoelectric energy harvesting / A. Erturk, D. J. Inman. — N. Y. : John Willey and Sons, Ltd., 2011. — 402 p.
2. Anton, S. R. Multifunctional Piezoelectric Energy Harvesting Concepts. PhD diss. to Virginia Polytechnic Institute and State University / S. R. Anton. — Blacksburg : Virginia, 2011. — 215 p.
3. Головнин, В. А.Сравнительные характеристики пьезокерамических механоэлектрических преобразователей для генерации электричества / В. А. Головнин [и др.] // Вестник Твер. гос. ун-та. Серия «Физика». — 2010. — № 11. — С. 33–46.
4. DuToit, N. E. Design considerations for MEMS-scale piezoelectric mechanical vibration energy harvesters / N. E. DuToit, B. L. Wardle, S. G. Kim // Integrated Ferroelectrics. — 2005. — V. 71. — №. 1. — Pp. 121–160.
5. DuToit, N. E. Experimental verification of models for microfabricated piezoelectric vibration energy harvesters / N. E. DuToit, B. L. Wardle // AIAA journal. — 2007. — V. 45. — №. 5. — Pp. 1126–1137.
6. Adhikari, S. Piezoelectric energy harvesting from broadband random vibrations / S. Adhikari, M. I. Friswell, D. J Inman // Smart Materials and Structures. — 2009. V. 18. — №. 11. — P. 115005.
7. Roundy, S. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics / S. Roundy, P. K. Wright // Smart Materials and Structures. — 2004. — V. 13. — №. 5. — P. 1131.
8. Зыонг, Ле В. Конечно-элементный анализ применимости прикладных теорий расчета пьезоэлектрического устройства накопления энергии стековой конфигурации / Ле В. Зыонг // Инженерный вестник Дона. — 2014. — № 2. — С. 1–13.
9. Анализ стабильности электрофизических характеристик пьезокерамик различных составов, используемых для пьезоэлектрических генераторов кантилеверного типа повышенной мощности / В. А. Акопьян [и др.] // Нано- и микросистемная техника. — 2012. — № 1. — С. 37–41.
10. Многослойные пьезоэлектрические актуаторы и особенности их применения / В. К. Казаков [и др.] // Компоненты и технологии. — 2007. — № 6. — С. 62–65.
11. Гриценко, А. Состояние и перспективы развития пьезоэлектрических генераторов / А. Гриценко, В. Никифоров, Т. Щеголева // Компоненты и технологии. — 2012. — № 9. — С. 63–68.
12. Морозов, А. Г. Электротехника, электроника и импульсная техника / А. Г. Морозов. — Москва : Высшая школа, 1987. — 448 с.
13. Влияние вида механического нагружения на энергоэффективность пьезоэлектрических генераторов / В. А. Акопьян [и др.] // Нано- и микросистемная техника. — 2015. — № 2. — С. 33–44.
14. Zhao, S. Deterministic and band-limited stochastic energy harvesting from uniaxial excitation of a multilayer piezoelectric stack / S. Zhao, A. Erturk // Sensors and Actuators A : Physical. — 2014. — V. 214. — Pp. 58–65.

References

1. Erturk, A., Inman, D.J. Piezoelectric energy harvesting. N. Y.: John Willey and Sons, Ltd., 2011, 402 p.
2. Anton, S. R. Multifunctional Piezoelectric Energy Harvesting Concepts. PhD diss. to Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg: Virginia, 201, 215 p.
3. Golovin, V.A., et al. Sravnitel'nye kharakteristiki p'yezokeramicheskikh mekhanoelektricheskikh preobrazovateley dlya generatsii elektrichestva. [Comparative characteristics of piezoceramic mechanoelectric transducers for generation of electricity.] Vestnik Tverskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya “Fizika”, 2010, no. 11, pp. 33–46 (in Russian).
4. DuToit, N.E., Wardle, B.L., Kim S.G. Design considerations for MEMS-scale piezoelectric mechanical vibration energy harvesters. Integrated Ferroelectrics, 2005, vol. 71, no. 1, pp. 121–160.
5. DuToit, N. E., Wardle, B.L. Experimental verification of models for microfabricated piezoelectric vibration energy harvesters. AIAA journal, 2007, vol. 45, no. 5, pp. 1126–1137.
6. Adhikari, S., Friswell, M.I., Inman, D.J. Piezoelectric energy harvesting from broadband random vibrations. Smart Materials and Structures, 2009, vol. 18, no. 11, pp. 115005.
7. Roundy, S., Wright, P. K. A piezoelectric vibration based generator for wireless electronics. Smart Materials and Structures, 2004, vol. 13, no. 5, pp. 1131.
8. Duong, Le V. Konechno-elementnyy analiz primenimosti prikladnykh teoriy rascheta p'yezoelektricheskogo ustroystva nakopleniya energii stekovoy konfiguratsii. [Finite element analysis of the applicability of the applied theories of calculation of piezoelectric device of energy storage of stack configuration.] Engineering Journal of Don, 2014, no. 2, pp. 1–13 (in Russian).
9. Akopyan, V.A., et al. Analiz stabil'nosti elektrofizicheskikh kharakteristik p'yezokeramik razlichnykh sostavov, ispol'zuemykh dlya p'yezoelektricheskikh generatorov kantilevernogo tipa povyshennoy moshchnosti. [Analysis of the Electro-Physical Characteristics Piezoceramics Different Composition Used for High Power Piezoelectric Generators.] Journal of Nano and Microsystem Technique, 2012, no. 1, pp. 37–41 (in Russian).

10. Kazakov, V.K., et al. Mnogosloynye p'yezoelektricheskie aktuatory i osobennosti ikh primeneniya. [Multilayer piezoelectric actuators and features of their application.] Components and Technologies, 2007, no. 6, pp. 62–65 (in Russian).
11. Gritsenko, A., Nikiforov, V., Shchegoleva, T. Sostoyanie i perspektivy razvitiya p'yezoelektricheskikh generatorov. [State and prospects of piezoelectric generators.] Components and Technologies, 2012, no. 9, pp. 63–68 (in Russian).
12. Morozov, A.G. Elektrotekhnika, elektronika i impul'snaya tekhnika. [Electrotechnics, Electronics and pulse Engineering.] Moscow: Vysshaya shkola, 1987, 448 p. (in Russian).
13. Akopyan, V.A., et al. Vliyanie vida mekhanicheskogo nagruzheniya na energoeffektivnost' p'yezoelektricheskikh generatorov. [Influence of the type of mechanical loading on the energy efficiency of the piezoelectric generators.] Journal of Nano and Microsystem Technique, 2015, no. 2, pp.C. 33–44 (in Russian).
14. Zhao, S., Erturk, A. Deterministic and band-limited stochastic energy harvesting from uniaxial excitation of a multilayer piezoelectric stack. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, vol. 214, pp. 58–65.

Поступила в редакцию 24.11.2015
Сдана в редакцию 25.11.2015
Запланирована в номер 22.01.2016

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 62-251:621.91-755:519.87 DOI 10.12737/18141

Повышение адекватности механико-математической модели динамики ротора на балансировочном станке*

О. А. Полушкин[1], О. О. Полушкин[2], И. М. Фофана[3]**
[1, 2, 3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Improving adequacy of mechanical-mathematical model of rotor dynamics on the balancing machine ***

O. A. Polushkin[1], O. O. Polushkin[2], I. M. Fofana[3]**
[1, 2, 3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Цель данного исследования — определение условий повышения эффективности функционирования балансировочного оборудования. В качестве задачи рассматривается повышение точности и снижение трудоемкости балансировки ротора. В основе исследования — модель ротора на балансировочном станке, рассмотренная с точки зрения теории колебаний как динамическая система с двумя степенями свободы. В результате проведенных изысканий, во-первых, обоснована необходимость использования в модели ротора векторных значений коэффициентов влияния дисбаланса в каждой из плоскостей коррекции на колебания опор ротора на балансировочном станке. Во-вторых, представлена методика их экспериментального определения. Полученные результаты могут быть использованы при создании балансировочного оборудования (балансировочные станки и балансировочные комплекты) нового поколения. Проведенное исследование представляет собой развитие современной теории и практики балансировки, направленное на повышение адекватности динамической модели ротора.

Ключевые слова: балансировочное оборудование, эффективность, динамика, модель функционирования, адекватность, векторные коэффициенты влияния.

The work objective is to determine the conditions for improving the operating efficiency of the balancing equipment. The problem is to increase accuracy and to reduce labor intensity of the rotor balancing. A rotor model on the balancing machine considered according to the vibration theory as a dynamic system with two degrees of freedom forms the basis of the research. As a result of the investigations, first, the necessity of applying vector influence coefficient values of the rotor model unbalance in each of the correction planes on the vibrations of the rotor poles on the balancer is proved. Secondly, the technique of their experimental determination is presented. The results obtained can be used to create balancing equipment (balancing machines and balancing sets) of new generation. The study is the development of the modern theory and practice balancing aimed at improving the adequacy of the dynamic rotor model.

Keywords: balancing equipment, efficiency, dynamics, functional model, adequacy, vector influence coefficients.

Введение. В современной производственной практике приходится решать такие проблемы, как снижение вибрации и шума машин, повышение их надежности и качества функционирования, улучшение условий труда персонала, управляющего работой машины. Эффективным средством решения подобных задач является балансировка роторов — в том числе и высокооборотных карданных передач автомобилей. Этим объясняются высокие требования, предъявляемые к балансировке роторов. В первую очередь речь идет о качестве ее исполнения (на эксплуатационной

* Работа выполнена по договору № 89-12Н от 27.01.2012.
** E-mail: grunt@mail.ru, nazyroo@mail.ru
*** The research is done within the frame of Contract no. 89-12H, 27.01.2012.

частоте вращения остаточные дисбалансы ротора в плоскостях его коррекции не должны превосходить допустимые значения, регламентируемые технической документацией). Кроме того, следует учитывать трудозатраты балансировки в производстве машин и при их ремонте (минимизация числа балансировочных циклов как основа снижения трудозатрат балансировки).

Реализация этих требований напрямую зависит от адекватности механико-математической модели балансируемого изделия. Использование такой модели на балансировочном станке позволяет установить связь между характеристиками колебаний опор балансируемого изделия и дисбалансами в плоскостях его коррекции с учетом их взаимного влияния на колебания опор.

В первых станках для динамической балансировки роторов (например, станки рамного типа конструкции Б. В. Шитикова [1–3]) задача решалась механическим исключением взаимного влияния плоскостей коррекции. С этой целью последовательно включалась и отключалась податливость шарнирных опор рамы, совмещенных с плоскостями коррекции балансируемого изделия. При этом использовалась простейшая механико-математическая модель балансируемого изделия на станке

$$\overline{A_i} = K_i \times \overline{D_i}; \quad i = 1, 2, \tag{1}$$

где $\overline{A_i} = A_i \times e^{i\varphi_i}$ — амплитуда A_i и фаза φ_i колебания податливой i-й опоры рамы станка при абсолютно жесткой другой ее опоре; K_i — скалярный коэффициент влияния, определяемый экспериментально; $\overline{D_i}$ — оценка дисбаланса в i-й плоскости коррекции, сонаправленного с $\overline{A_i}$ ($\overline{D_i} = D_i \times e^{i\varphi_i}$, где D_i — значение, а φ_i — угол дисбаланса $\overline{D_i}$).

Такая модель имеет низкую адекватность и требует большого количества балансировочных циклов, что объясняется необходимостью последовательных замеров и корректировок дисбалансов отдельно в каждой из плоскостей коррекции.

В функционировании появившихся позже станков маятникового типа использовалась модель [4]:

$$\left\{\overline{A_i}\right\} = \left[K_{ij}\right] \times \left\{\overline{D_j}\right\}; \; i = 1, 2; \; j = 1, 2, \tag{2}$$

где $\{\overline{A_i}\}$ — матрица-столбец амплитуд и фаз синхронных колебаний опор i = 1, 2 ротора на станке; $\{\overline{D_j}\}$ — матрица-столбец искомых дисбалансов в плоскостях коррекции j = 1, 2 отстоящих от левой и правой опор ротора на расстояния A и C соответственно; $[K_{ij}]$ — матрица скалярных коэффициентов влияния:

$$\left[K_{ij}\right] = \left(l - A - C\right)^{-1} \times \begin{bmatrix} l - A & A \\ C & l - C \end{bmatrix}, \tag{3}$$

где l — расстояние между опорами ротора на балансировочном станке.

Заметим, что здесь и ниже обозначения матриц столбцов раскрывают и по [5] как $\{X_i\} = \{X_1\ X_2 \ldots\ X_i \ldots X_n\} = (X_1\ X_2 \ldots X_i \ldots X_n)^T$ при $i = 1 \ldots n$.

В отличие от (1), модель (2) позволяет получить оценки дисбалансов $\{\overline{D_j}\}$ сразу в двух плоскостях коррекции за один балансировочный цикл. Однако эти оценки имеют низкую достоверность, т. к. матрица (3) предусматривает статическое распределение дисбалансов между опорами, не учитывая динамические свойства колебательной системы ротора на балансировочном станке. Поэтому, сокращая число балансировочных циклов определения и корректировки $\{\overline{D_j}\}$, модель (2), как и модель (1), не имеет достаточно высокой адекватности.

Повышение эффективности функционирования станков маятникового типа привело к необходимости использования механико-математической модели (2) с матрицей скалярных коэффициентов влияния [4, 6–8]:

$$\left[K_{ij}\right] = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix}, \tag{4}$$

Элементы которой определяются тарировкой измерительной системы станка на частоте вращения, принятой для балансировки изделия.

Если речь идет об универсальных балансировочных станках, такая матрица строится для заданных совместно диапазонов масс балансировочных изделий и частот их вращения при балансировке.

Модель (2) с матрицей (4) коэффициентов влияния лишь количественно учитывает динамические свойства колебательной системы балансируемого изделия на балансировочном станке. Поэтому дальнейшее повышение адекватности механико-математической модели (2) целесообразно искать с использованием матрицы векторных коэффициентов влияния

$$\left[\bar{K}_{ij}\right]=\begin{bmatrix}\bar{K}_{11} & \bar{K}_{12}\\ \bar{K}_{21} & \bar{K}_{22}\end{bmatrix}, \tag{5}$$

определяемых экспериментально для принятой частоты вращения ротора при его балансировке. Это предложено в работе [9], цитируемой по [10]. Однако на практике данный подход не получил развития из-за отсутствия теоретических обоснований возможности и необходимости его использования, а также из-за сложности его реализации с помощью предложенного в указанных работах графоаналитического метода.

Ниже представлены необходимые теоретические обоснования и практически реализуемая методика определения векторных коэффициентов влияния $\left[\bar{K}_{ij}\right]$; $i = 1, 2$; $j = 1, 2$, обеспечивающих наибольшую адекватность использования механико-математической модели динамики неуравновешенного двухопорного ротора на балансировочном станке:

$$\left\{\overline{A_i}\right\}=\left[\bar{K}_{ij}\right]\times\left\{\overline{D_j}\right\}; i=1,2;\ j=1,2. \tag{6}$$

Теоретический анализ коэффициентов влияния. На рис. 1 представлена динамическая модель идеального однородного жесткого двухопорного ротора с податливыми и демпфированными опорами на балансировочном станке.

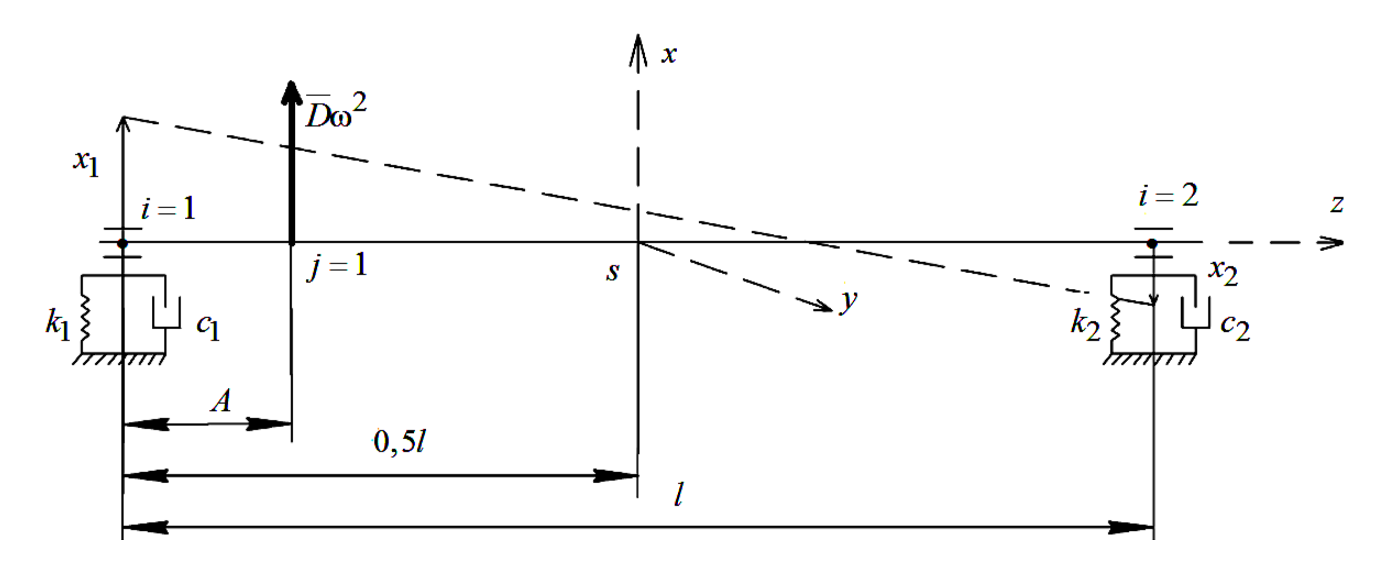


Рис. 1. Модель для анализа колебаний опор ротора на балансировочном станке
от проявления дисбаланса $\bar{D}$ в левой плоскости коррекции (j = 1)

Модель имеет две степени свободы, описывающие вынужденные колебания вращающегося со скоростью ω ротора в горизонтальной плоскости xz. Эти колебания генерируются усилием $\bar{D}\times\omega^2$ от дисбаланса $\bar{D}=D\times e^{i\varphi_D}$ со значением D. Здесь φ_D — угол идеально уравновешенного ротора, установленного в плоскости коррекции, отстоящей от левой опоры на расстояние A. На рис. 1 показаны положения колебательной системы: статически равновесное (сплошная линия) и текущее (пунктирная линия). Здесь также обозначены:

— l — как и ранее, расстояние между опорами ротора;

— s — положение центра масс ротора;

— k_1, k_2 — жесткости 1-й и 2-й опор ротора на балансировочном станке;

— c_1, c_2 — коэффициенты диссипативности опор;

— x_1, x_2 — перемещения опор, которые принимаем за обобщенные координаты.

Для составления уравнений движения в обобщенных координатах используем уравнения Лагранжа второго рода с учетом диссипативных сил [11]:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}_i}\right)+\frac{\partial F}{\partial \dot{x}_i}-\frac{\partial\left(T-U\right)}{\partial x_i}=Q_i; i=1,2, \tag{7}$$

в которых T, U — выражения для расчета кинетической и потенциальной энергии; F — диссипативная функция;

Q_i — обобщенные силы.

Выражая через обобщенные координаты x_1, x_2 перемещение x центра S масс ротора и поворот φ его оси как

$$x = \frac{x_1 + x_2}{2};\varphi = \frac{x_1 - x_2}{l},$$

раскрываем входящие в (7) выражения:

$$T = \frac{1}{2}m\times\dot{x}^2 + \frac{1}{2}I\times\dot{\varphi}^2 = \frac{1}{8}m\times\left(\dot{x}_1 + \dot{x}_2\right)^2 + \frac{I}{2l^2}\times\left(\dot{x}_1 - \dot{x}_2\right)^2;$$

$$U = \frac{1}{2}k_1\times x_1^2 + \frac{1}{2}k_2\times x_2^2; F = \frac{1}{2}c_1\times\dot{x}_1^2 + \frac{1}{2}c_2\times\dot{x}_2^2;$$

$$Q_1 = D\times\omega^2\times\frac{l - A}{l}\times\cos\left(\omega t + \varphi_D\right);$$

$$Q_2 = D\times\omega^2\times\frac{A}{l}\times\cos(\omega t + \varphi_D), \tag{8}$$

в которых m — масса ротора; I — момент инерции ротора относительно оси y.

Выполнив дифференцирование выражений (8) по форме уравнений Лагранжа (7) и используя для решения полученных уравнений метод комплексных амплитуд [11], представляем эти уравнения в матричном виде:

$$\left[A\right]\times\left\{\ddot{q}\right\} + \left[B\right]\times\left\{\dot{q}\right\} + \left[C\right]\times\left\{q\right\} = \left\{F_0\right\}\times e^{i\omega t}, \tag{9}$$

где $\left[A\right] = \begin{bmatrix} \frac{1}{4}m + \frac{I}{l^2} & \frac{1}{4}m - \frac{I}{l^2} \\ \frac{1}{4}m - \frac{I}{l^2} & \frac{1}{4}m + \frac{I}{l^2} \end{bmatrix}$ — матрица инерционных коэффициентов; $\left[B\right] = diag\left[c_1\, c_2\right]$ — диагональная матрица диссипативных коэффициентов; $\left[C\right] = diag\left[k_1\, k_2\right]$ — диагональная матрица квазиупругих коэффициентов; $\{\ddot{q}\} = \{\ddot{x}_1\ \ddot{x}_2\}$; $\{\dot{q}\} = \{\dot{x}_1\ \dot{x}_2\}$; $\{q\} = \{x_1\ x_2\}$ — матрицы-столбцы обобщенных ускорений, скоростей и перемещений соответственно; $\left\{F_0\right\} = \frac{\bar{D}\times\omega^2}{l}\times\left\{\left(l - A\right)A\right\}$ — матрица-столбец обобщенных сил.

При решении уравнения (9) в виде $\left\{q\right\} = \left\{f\right\}\times e^{i\omega t}$ подстановкой входящих в него величин получили выражение для расчета матрицы комплексных амплитуд в виде

$$\left\{f\right\} = \left(\left[C\right] - \omega^2\times\left[A\right] + i\omega\times\left[B\right]\right)^{-1}\left\{F_0\right\}, \tag{10}$$

где степень –1 указывает на обращение матрицы, заключенной в круглые скобки.

Раскрывая комплексные амплитуды через их действительные (a_i) и мнимые (b_i) слагаемые и используя формулу Эйлера, можно записать:

$$\left\{f\right\} = \left\{a_1 + ib_1\ a_2 + ib_2\right\} = \left\{A_1\times e^{i\alpha_1}\ A_2\times e^{i\alpha_2}\right\}, \tag{11}$$

где $A_i = \sqrt{a_i^2 + b_i^2}$; $\alpha_i = \text{sign}\left(b_i\right)\arccos\frac{a_i}{A_i}$ — амплитуда и фаза колебаний i-й опоры ротора на балансировочном станке (i = 1,2).

Элементы матрицы $\{f\}$ по (11), определенные по (10), — комплексные величины, т. к. элементы квадратной матрицы

$$\left[L\right]^{-1} = \left(\left[C\right] - \omega^2\times\left[A\right] + i\omega\times\left[B\right]\right)^{-1}, \tag{12}$$

описывающей собственные свойства колебательной системы ротора на балансировочном станке, являются комплексными числами из-за учета объективно существующего демпфирования в опорных элементах ротора на станке. Раскрытием входящих в (12) матриц получаем

$$[L]^{-1} = \begin{bmatrix} k_1 - \omega^2 \times \left(\frac{1}{4}m + \frac{I}{l^2}\right) + i\omega \times c_1 & -\omega^2 \times \left(\frac{1}{4}m - \frac{I}{l^2}\right) \\ -\omega^2 \times \left(\frac{1}{4}m - \frac{I}{l^2}\right) & k_2 - \omega^2 \times \left(\frac{1}{4}m + \frac{I}{l^2}\right) + i\omega \times c_2 \end{bmatrix}^{-1}$$

что после обращения матрицы позволяет найти:

$$[L]^{-1} = \frac{1}{\det[L]} \begin{bmatrix} k_2 - \omega^2 \times \left(\frac{1}{4}m + \frac{I}{l^2}\right) + i\omega \times c_2 & \omega^2 \times \left(\frac{1}{4}m - \frac{I}{l^2}\right) \\ \omega^2 \times \left(\frac{1}{4}m - \frac{I}{l^2}\right) & k_1 - \omega^2 \times \left(\frac{1}{4}m + \frac{I}{l^2}\right) + i\omega \times c_1 \end{bmatrix}, \tag{13}$$

где

$$\det[L] = \left\{k_1 - \omega^2 \times \left(\frac{1}{4}m + \frac{I}{l^2}\right) + i\omega \times c_1\right\} \times \left\{k_2 - \omega^2 \times \left(\frac{1}{4}m + \frac{I}{l^2}\right) + i\omega \times c_2\right\} - \omega^4 \times \left(\frac{1}{4}m - \frac{I}{l^2}\right)^2 \tag{14}$$

— определитель матрицы $[L]$.

Если в рассматриваемой на рис. 1 плоскости коррекции (ее обозначили как $j = 1$), расположенной на расстоянии A от левой опоры ротора, установлен единичный дисбаланс $\overline{D}$, имеющий значение $D = 1$ и угол $\varphi_D = 0$, то определенные по (10) комплексные амплитуды будут представлять собой искомые векторные коэффициенты влияния дисбаланса в $j = 1$-й плоскости коррекции на колебания опор $i = 1{,}2$ ротора:

$$\left\{\overline{K_{11}}\,\overline{K_{21}}\right\} = \left\{K_{11} \times e^{i\beta_{11}}\; K_{21} \times e^{i\beta_{21}}\right\} = \frac{\omega^2}{l} \times [L]^{-1} \times \{(l - A)A\}. \tag{15}$$

На рис. 2 представлена динамическая модель того же, что и на рис. 1, ротора, имеющего те же собственные свойства колебательной системы на балансировочном станке (они описываются той же матрицей $[L]^{-1}$ по (12)).

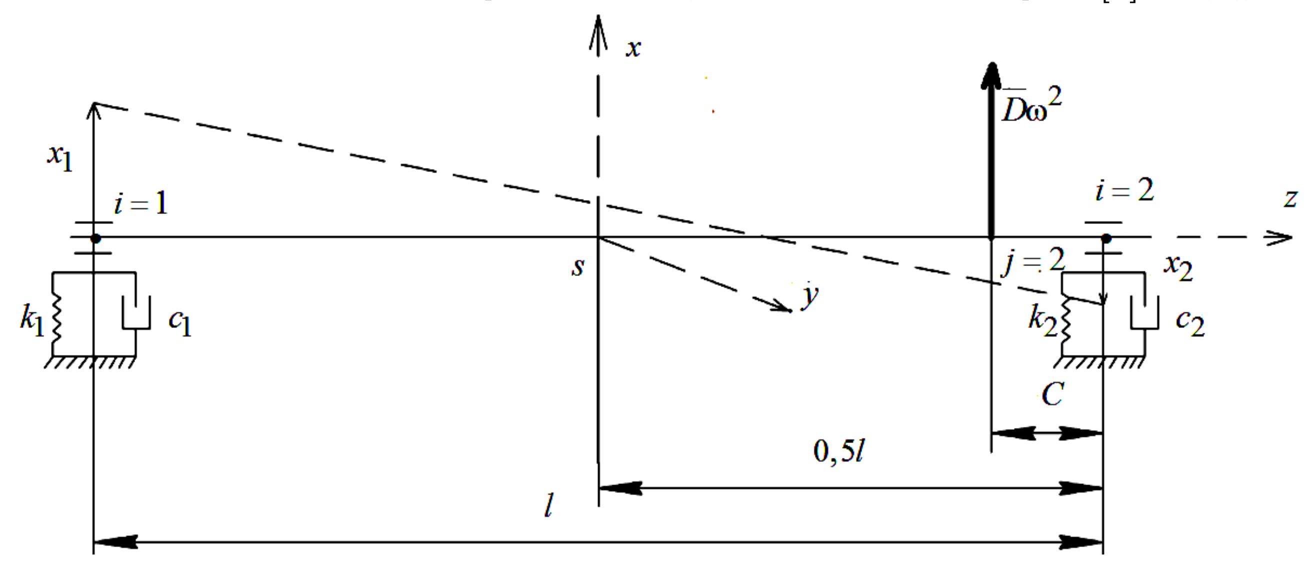


Рис. 2. Модель для анализа колебаний опор ротора на балансировочном станке
от проявления дисбаланса $\overline{D}$ в правой плоскости коррекции ($j = 2$)

Колебания опор этого идеально уравновешенного ротора при его вращении на балансировочном станке возбуждаются лишь дисбалансом $\overline{D}$, установленным в плоскости коррекции $j = 2$, расположенной на расстоянии C от правой опоры $i = 2$ ротора.

Колебательный процесс модели на рис. 2 будет описываться тем же уравнением (9), в котором матрица – столбец обобщенных сил должна представляться как

$$\{F_0\} = \frac{\overline{D} \times \omega^2}{l} \times \{C(l - C)\}. \tag{16}$$

Принимая $D = 1$, $\varphi_D = 0$ и подставляя (16) в (10), получаем уравнения для расчета коэффициентов влияния дисбаланса в плоскости коррекции $j = 2$ на колебания опор $i = 1{,}2$ ротора на балансировочном станке:

$$\left\{\overline{K_{12}}\,\overline{K_{22}}\right\} = \left\{K_{12} \times e^{i\beta_{12}}\ K_{22} \times e^{i\beta_{22}}\right\} = \frac{\omega^2}{l} \times \left[L\right]^{-1} \times \left\{C\left(l - C\right)\right\}, \qquad (17)$$

в котором $[L]^{-1}$ та же, что и в (15).

Анализ теоретических зависимостей (15), (17) и входящих в них соотношений (13), (14) позволяет утверждать следующее:

— учитывая наличие демпфирования колебаний опор ротора на балансировочном станке, коэффициенты влияния дисбалансов в плоскостях коррекции $j = 1{,}2$ на колебания опор $i = 1{,}2$ ротора необходимо рассматривать как векторные величины ($\overline{K_{ij}} = K_{ij} \times e^{i\beta_{ij}}, i = 1, 2\ ; j = 1, 2$);

— значения K_{ij} и углы β_{ij} коэффициентов влияния K_{ij} существенно зависят от скорости ω балансировки ротора на станке. От ω зависят также характеристики $\left\{\overline{A_i}\right\}$ колебаний опор неуравновешенного ротора на балансировочном станке. Поэтому для использования модели (6) при балансировке ротора элементы матриц $\left\{\overline{A_i}\right\}$ и $\left[\overline{K_{ij}}\right]$ должны быть определены на одной и той же скорости ω вращения ротора. При этом значение ω балансировки жесткого ротора не влияет на определяемые посредством (6) характеристики $\left\{\overline{D_j}\right\}$ его неуравновешенности;

— векторы $\bar{K}_{ij}$ практически не совпадают как по значениям, так и по углам для любых сочетаний i и j. Лишь теоретически не исключен случай, когда $k_1 = k_2$, $c_1 = c_2$, $A = C$, при котором имеет место $\overline{K_{11}} = \overline{K_{22}}\ ; \overline{K_{12}} = \overline{K_{21}}$;

— значения и углы векторных коэффициентов влияния для принятой скорости ω балансировки заданной конструкции ротора на определенном балансировочном станке зависят только от координаты, определяющей положение плоскости коррекции относительно одной из опор ротора.

Поясняя последнее, отметим, что при подстановке в (15) задаваемого значения A, определяющего положение плоскости коррекции $j = 1$ относительно опоры $i = 1$, рассчитывается матрица-столбец $\left\{\overline{K_{11}}\,\overline{K_{21}}\right\}$ коэффициентов влияния. Если в том же уравнении (15) принять $A = l - C$ — координату плоскости коррекции $j = 2$ относительно $i = 1$-й опоры, то результатом расчета будет матрица-столбец $\left\{\overline{K_{12}}\,\overline{K_{22}}\right\}$ коэффициентов влияния. Те же результаты получаются и с использованием уравнения (17). В этом случае в расчет вводятся значения C — расстояния от плоскости коррекции $j = 2$ до опоры $i = 2$ ротора на станке, и таким образом находится матрица-столбец $\left\{\overline{K_{12}}\,\overline{K_{22}}\right\}$ коэффициентов влияния. Принимая в том же уравнении $C = l - A$ — расстояние от опоры $i = 2$ до плоскости коррекции $j = 1$, находим матрицу-столбец $\left\{\overline{K_{11}}\,\overline{K_{21}}\right\}$ коэффициентов влияния.

Таким образом, по каждому из соотношений (15), (17) могут быть найдены коэффициенты влияния дисбаланса в любой плоскости коррекции (не только в $j = 1, 2$) на колебания опор $i = 1, 2$ ротора на балансировочном станке. Для этого задается либо расстояние A (рис. 1 с использованием уравнения (15)), либо расстояние C (рис. 2 с использованием уравнения (17)).

Методика определения коэффициентов влияния. При балансировке конкретного изделия находить векторные коэффициенты влияния аналитическим методом нерационально из-за трудоемкости и неточности определения величин, входящих в (15) или (17), и, как следствие, значительной погрешности результатов расчета. Аналогичным образом объясняется отказ от использования векторных коэффициентов влияния с графическим методом их определения [9, 10], о чем упоминалось выше.

Излагаемая ниже методика натурного определения векторных коэффициентов влияния для жесткого двухопорного ротора строится на ряде допущений.

— Амплитуды A_i, фазы α_i колебаний $\overline{A_i} = A_i \times e^{i\alpha_i}$ опор $i = 1, 2$ ротора и частота его вращения при балансировке определяются только характеристиками неуравновешенности ротора.

— Неуравновешенность ротора полностью определяется искомыми и корректируемыми при балансировке дисбалансами $\overline{D_j} = D_j \times e^{i\varphi_j}$ в двух заданных плоскостях его коррекции ($j = 1{,}2$).

— При анализе малых колебаний опор ротора от различных источников используется принцип суперпозиции.

Возможность принятия этих допущений при моделировании неуравновешенности и колебаний жестких роторов на балансировочном станке доказана существующей практикой балансировки.

Рассмотрим ротор, имеющий в заданных плоскостях коррекции $j = 1, 2$ искомые дисбалансы $\overline{D_1} = D_1 \times e^{i\varphi_1}$, $\overline{D_2} = D_2 \times e^{i\varphi_2}$. С приведением этого ротора во вращение на балансировочном станке колебания $\overline{A_i}$ его опор будут описываться выражением (6), раскрываемом как

$$\overline{A_1} = \overline{K_{11}} \times \overline{D_1} + \overline{K_{12}} \times \overline{D_2} ;$$
$$\overline{A_2} = \overline{K_{21}} \times \overline{D_1} + \overline{K_{22}} \times \overline{D_2} . \tag{18}$$

Установим в плоскости коррекции $j = 1$ пробный дисбаланс $\overline{D_{n1}} = D_{n1} \times e^{i\varphi_{n1}}$ с заданными значением D_{n1} и углом $\varphi_{П1}$. После приведения во вращение колебания опор этого ротора будут описываться:

$$\overline{A_{11}} = \overline{K_{11}} \times \left(\overline{D_1} + \overline{D_{n1}}\right) + \overline{K_{12}} \times \overline{D_2} ;$$
$$\overline{A_{21}} = \overline{K_{21}} \times \left(\overline{D_1} + \overline{D_{n1}}\right) + \overline{K_{22}} \times \overline{D_2} . \tag{19}$$

Вычитая из (19) выражения (18), находим

$$\bar{A}_{11} - \bar{A}_1 = A_{11} \times e^{i\alpha_{11}} - A_1 \times e^{i\alpha_1} = \bar{K}_{11} \times D_{n1} \times e^{i\varphi_{n1}};$$
$$\bar{A}_{21} - \bar{A}_2 = A_{21} \times e^{i\alpha_{21}} - A_2 \times e^{i\alpha_2} = \bar{K}_{21} \times D_{n1} \times e^{i\varphi_{n1}}.$$

Отсюда

$$\bar{K}_{11} = K_{11} \times e^{i\beta_{11}} = \frac{A_{11} \times e^{i\alpha_{11}} - A_1 \times e^{i\alpha_1}}{D_{n1} \times e^{i\varphi_{n1}}};$$
$$\overline{K}_{21} = K_{21} \times e^{i\beta_{21}} = \frac{A_{21} \times e^{i\alpha_{21}} - A_2 \times e^{i\alpha_2}}{D_{n1} \times e^{i\varphi_{n1}}}. \tag{20}$$

Удалим из плоскости коррекции $j = 1$ дисбаланс D_{n1} и установим в плоскости коррекции $j = 2$ пробный дисбаланс $\overline{D_{n2}} = D_{n2} \times e^{i\varphi_{n2}}$ с заданными значением D_{n2} и углом $\varphi_{П2}$. Опишем колебания опор этого ротора на станке:

$$\overline{A_{12}} = \overline{K_{11}} \times \overline{D_1} + \overline{K_{12}} \times \left(\overline{D_2} + \overline{D_{n2}}\right);$$

$$\overline{A_{22}} = \overline{K_{21}} \times \overline{D_1} + \overline{K_{22}} \times \left(\overline{D_2} + \overline{D_{n2}}\right) \tag{21}$$

Вычитая из (21) уравнения (18), окончательно получаем:

$$\bar{K}_{12} = K_{12} \times e^{i\beta_{12}} = \frac{A_{12} \times e^{i\alpha_{12}} - A_1 \times e^{i\alpha_1}}{D_{n2} \times e^{i\varphi_{n2}}};$$
$$\bar{K}_{22} = K_{22} \times e^{i\beta_{22}} = \frac{A_{22} \times e^{i\alpha_{22}} - A_2 \times e^{i\alpha_2}}{D_{n2} \times e^{i\varphi_{n2}}}. \tag{22}$$

Выражения (20), (22) определяют векторные коэффициенты влияния через заданные характеристики пробных дисбалансов $\overline{D_{n1}}$, $\overline{D_{n2}}$ и определенные замерами на балансировочном станке характеристики (амплитуды и фазы) колебаний опор $i = 1, 2$ ротора с пробными дисбалансами и без них.

Формируя по результатам расчетов матрицу $\left[\bar{K}_{ij}\right]$ по (5), находим дисбалансы $\overline{D_1}$, $\overline{D_2}$ балансируемого ротора в принятых плоскостях его коррекции:

$$\left\{\overline{D_i}\right\} = \left[\bar{K}_{ij}\right]^{-1} \times \left\{A_i\right\} . \tag{23}$$

При необходимости балансировки партии изделий одного типоразмера (как это требуется, например, при балансировке карданных передач в производстве и ремонте автомобилей одной модели) матрица $\left[\overline{K}_{ij}\right]$, построенная по изложенной методике для одного изделия, «обучает» измерительную систему станка для использования ее при балансировке всех изделий партии.

В лаборатории «Динамика приводов, вибрации и диагностика качества машин» Донского государственного технического университета был поставлен эксперимент. В ходе работы была реализована балансировка двухшарнирной карданной передачи 2121-2201012-04 автомобиля «Нива» по существующей технологии с использованием матри-

цы скалярных коэффициентов влияния (4) и балансировка той же передачи по новой технологии с использованием матрицы векторных коэффициентов влияния (5). С учетом контрольного измерения первая технология была реализована за 5 балансировочных циклов, вторая — за два цикла при одних и тех же значениях допустимых дисбалансов.

Заключение. Для разработки балансировочного оборудования нового поколения и прогрессивных технологий балансировки следует использовать механико-математические модели. В данном случае речь идет о моделях динамики ротора с векторными коэффициентами влияния дисбалансов в плоскостях коррекции на характеристики колебаний опор. Целесообразность такого подхода теоретически обоснована. Предложенная методика определения векторных коэффициентов влияния обеспечивает получение достоверных результатов и легко реализуется на компьютере. Обеспечивая более высокую адекватность, модель с векторными коэффициентами влияния позволяет повысить точность определения дисбалансов балансируемого изделия в плоскостях коррекции, уменьшая тем самым необходимое число балансировочных циклов и трудозатраты балансировки.

Библиографический список

1. Шитиков, Б. В. Динамическая балансировка роторов / Б. В. Шитиков. — Москва : Трансжелдориздат, 1951. — 123 с.

2. Полушкин, О. А. Изыскание и разработка методики оптимального нормирования остаточного дисбаланса ротационных узлов зерноуборочных машин : дис. … канд. техн. наук / О. А. Полушкин. — Ростов-на-Дону, 1968. — 184 с.

3. 100 Years of balancing technology [Электронный ресурс] / SCHENCK Corporation USA // SCHENCK. Balancing & Diagnostic Systems. — Режим доступа: http://www.schenck-usa.com/company/information/history.php (дата обращения: 27.01.16).

4. Декамили, Л. Е. Анализ и синтез статической модели функционирования балансировочного станка / Л. Е. Декамили, О. А. Полушкин, В. А. Фокин // Динамика узлов и агрегатов сельскохозяйственных машин : межвуз. сб. науч. тр.— Ростов-на-Дону, 1993. — С. 39–43.

5. Корн, Г. Справочник по математике. Для научных работников и инженеров / Г. Корн, Т. Корн. — Москва : Наука, 1974. — 832 с.

6. Alauze C. Equilibrage actif des machines tournantes: application aux grandes lignes d'arbres : thèse de doctorat / C. Alauze. — Insa ; Lyon, 1998. — 126 p.

7. Lalanne, M. Mécanique des vibrations linéaires / M. Lalanne, P. Berthier, J. Der Hagopian. — 2ème édition, 2ème tirage corrigé. — Paris : Masson, 1992. — 306 p.

8. Beards, C.-F. Structural vibration. Analysis and damping / C. F. Beards. — London : Arnold, 1996. — 287 p.

9. Fryml, B. Vyvažování rotačních strojů v technické praxi / B. Fryml, V. Boruvka. — Praha : SNTL, 1962. — 233 s.

10. Вибрации в технике. Справочник в 6 т. / гл. ред., пред. ред. совета В. Н. Челомей. — Москва : Машиностроение. — Т. 6 : Защита от вибраций и ударов / под ред. К. В. Фролова. — 1981. — 456 с.

11. Вибрации в технике. Справочник в 6 т. / гл. ред., пред. ред. совета В. Н. Челомей. — Москва : Машиностроение. — Т. 1 : Колебания линейных систем / под ред. В. В. Болотина. — 1978. — 352 с.

References

1. Shitikov, B.V. Dinamicheskaya balansirovka rotorov. [Dynamic balancing of rotors.] Moscow: Transzheldorizdat, 1951, 123 p. (in Russian).

2. Polushkin, O.A. Izyskanie i razrabotka metodiki optimal'nogo normirovaniya ostatochnogo disbalansa rotatsionnykh uzlov zernouborochnykh mashin : dis. … kand. tekhn. nauk. [Research and method development of optimal normalization of rest unbalance of rotary units of the grain harvesters: Cand.Sci. (Eng.) diss.] Rostov-on-Don, 1968, 184 p. (in Russian).

3. 100 Years of balancing technology.SCHENCK Corporation USA. SCHENCK. Balancing & Diagnostic Systems. Available at: http://www.schenck-usa.com/company/information/history.php (accessed: 27.01.16).

4. Dekamily, L.E., Polushkin, O.A., Fokin, V.A. Analiz i sintez staticheskoy modeli funktsionirovaniya balansirovochnogo stanka. [Analysis and synthesis of static model of the balancing machine operation.] Dinamika uzlov i agregatov sel'skokhozyaystvennykh mashin : mezhvuz. sb. nauch. tr. [Dynamics of assemblies and units of agricultural machinery: Interuniversity Coll. Sci. Papers. Rostov-on-Don, 1993, pp. 39–43 (in Russian).

5. Korn, G., Korn, T. Spravochnik po matematike. Dlya nauchnykh rabotnikov i inzhenerov. [Handbook on mathematics. For researchers and engineers.] Moscow: Nauka, 1974, 832 p. (in Russian).

6. Alauze, C. Equilibrage actif des machines tournantes: application aux grandes lignes d'arbres : thèse de doctorat. Insa ; Lyon, 1998, 126 p.

7. Lalanne, M., Berthier, P., Der Hagopian, J. Mécanique des vibrations linéaires. 2ème édition, 2ème tirage corrigé. Paris: Masson, 1992, 306 p.
8. Beards, C.-F. Structural vibration. Analysis and damping. London: Arnold, 1996, 287 p.
9. Fryml, B., Boruvka, V. Vyvažování rotačních strojů v technické praxi. Praha: SNTL, 1962, 233 s.
10. Chelomey, V.N., chief ed.; Frolov, K.V., ed. Vibratsii v tekhnike. Spravochnik v 6 t. [Vibrations in engineering. Handbook in 6 vol.] T. 6: Zashchita ot vibratsiy i udarov [Vol. 6: Vibration and shock protection.] Moscow: Mashinostroenie, 1981, 456 p. (in Russian).
11. Chelomey, V.N., chief ed.; Bolotin, V.V., ed. Vibratsii v tekhnike. Spravochnik v 6 t. [Vibrations in engineering. Handbook in 6 vol.] T. 1: Kolebaniya lineynykh system. [Vol. 1: Vibrations of linear systems.] Moscow: Mashinostroenie, 1978, 352 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 22.09.2015
Сдана в редакцию 22.09.2015
Запланирована в номер 22.01.2016

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 676.03(07) DOI 10.12737/18156

Влияние формы гофрированного картона на амортизирующие свойства упаковки[*]

И. Р. Антибас[1], С. А. Партко[2], А. Н. Сиротенко[3]**
[1, 2, 3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Effect of corrugated cardboard shape on the packing damping properties[***]

I. R. Antypas[1], S. A. Partko[2], A. N. Sirotenko[3]
[1, 2, 3]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью работы является поиск таких форм гофрирования картона, которые позволили бы эффективно амортизировать ударную нагрузку на картонный лист — как вертикальную, так и горизонтальную.
Предмет исследования — эффективность амортизации картонной упаковки с сотовой структурой и альтернативной (с MS-профилем) под действием ударной нагрузки поперек и вдоль соты. В качестве задач проведенных изысканий рассматривались измерение и сравнение скорости деформации, а также способности поглощения ударной нагрузки образцов картонной упаковки со стандартным и альтернативным MS-гофрированием. Образцы находились под ударным воздействием. Амортизирующие свойства многослойной картонной упаковки размером 127×127 мм оценивались при следующих условиях: высота падения — 610 мм; скорость падения — 3,5 м/с; падающий вес — 12,5 кг; усилие сжатия — 340 Н. При этом регистрировались: сила сжатия; энергия удара; величина деформации. В результате проведенных экспериментов было установлено, что трех- и пятислойный образец с MS-профилем обладает лучшими амортизирующими свойствами (по сравнению с картоном со стандартной сотой такой же толщины). Применение семи- и девятислойного картона с MS-профилем нецелесообразно, ввиду незначительного преимущества по сравнению с трех- и пятислойным образцом.

Ключевые слова: картонная упаковка, сотовая структура, энергия удара, MS-профиль, амортизация, деформация.

The present work objective is searching for such forms of the cardboard corrugation which could effectively absorb the impact load on a cardboard sheet, both vertical and horizontal. The research subject is the depreciation efficiency of the cardboard package with a cell and an alternative (with MS-profile) structure by the action of shock across and along the honeycomb. Measurement and comparation of the deformation rate, as well as the shock absorption capacity of the sample cartons with the standard and alternative MS-corrugation are considered as the investigation tasks. The samples were under the impact force. Shock absorbing properties of the multilayer cardboard packaging in size of 127 × 127 mm were evaluated under the following conditions: drop height, 610 mm; impact speed, 3.5 m/s; falling weight, 12.5 kg; pressure load, 340 kg. In this case, pressing force, impact energy, deformation value is recorded. As a result of the experiments, it was found that a three- and five-layer sample with MS-profile has better shock absorbing properties (as compared to a standard cellular cardboard of the same thickness). The application of seven- and nine-layer cardboard with MS-profile is inappropriate due to a minor advantage over a three- and five-layer sample.

Keywords: cardboard packing, cellular structure, impact energy, MS-profile, depreciation, deformation.

Введение. Одно из важных условий сохранности упакованных продуктов — хорошие амортизирующие свойства тары. К упаковке предъявляются и такие требования, как технологичность изготовления, доступность, дешевизна и экологичность. Всем перечисленным требованиям удовлетворяет картон. Амортизирующие свойства такой тары зависят не только от толщины картонных листов, но и от их внутренней структуры [1]. Гофрированные картонные листы склеиваются в виде пчелиных сот, что позволяет компоновать плиты различной толщины [2, 3]. К перечисленным достоинствам такой упаковки следует добавить хорошую амортизацию нагрузки, которая действует вертикально картонному листу вдоль соты [4, 5].

[*]Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
[**]E-mail: imad.antypas@mail.ru, parlana@spark-mail.ru, andsirotenko@yandex.ru
[***]The research is done within the frame of the independent R&D.

Недостатком картонной упаковки с сотовой структурой является ухудшение амортизирующих свойств, если вектор нагрузки направлен не вдоль соты, не перпендикулярно листу. Из-за многочисленных, не поддающихся учету факторов воздействие нагрузки на упаковку строго вдоль соты — редкий случай, чаще всего нагрузка действует под углом к соте. В этом случае упаковка может разрушиться и не защитит от удара продукты [6]. Приходится ограничивать полезную массу контейнера, чтобы при транспортировке или кантовании не повредить защищаемый продукт [7].

Цель исследования. Целью исследования был поиск таких форм гофрирования картона, которые позволили бы эффективно амортизировать ударную нагрузку на картонный лист — как вертикальную, так и горизонтальную.

Основная часть. Механические свойства новых и существующих образцов упаковочного картона исследовались на ударной испытательной машине Instron 9250HV [8, 9] в университете Алеппо (Сирия).

Все образцы картонной упаковки имели размер 127×127 мм. Толщина варьировалась:

— один слой (0,5 дюйма — 12,7 мм);
— два слоя (1 дюйм — 25,4 мм);
— три слоя (1,5 дюйма — 38,1 мм).

Рассматривались также случаи, когда количество слоев было больше трех.

Каждый образец длительное время сушился в камере при температуре 40 °C и перед использованием взвешивался. Масса всех испытанных образцов была одинакова. Каждый опыт по испытанию механических свойств повторялся 4 раза.

Постоянные силовые факторы опытов подобраны с учетом особенностей силового воздействия на упаковку при кантовке контейнера:

— высота падения — 610 мм;
— скорость падения — 3,5 м/с;
— падающий вес — 12,5 кг;
— усилие сжатия — 340 кг.

При испытании образцов стандартной картонной упаковки с сотовой структурой в зависимости от времени регистрировались: сила сжатия, энергия удара и величина деформации.

Полученные результаты испытаний для трехслойного образца общей толщиной 38,1 мм (каждый слой по 12,7 мм) показаны в табл. 1. Нагрузка действует вдоль соты.

Таблица 1

Результаты испытаний образца упаковки со стандартной сотовой структурой толщиной 38 мм

№	Максимальная нагрузка, Н	Деформация при максимальной нагрузке, мм	Энергия удара при максимальной нагрузке, Дж	Суммарная энергия удара, Дж	Скорость, м/с
1	232,4	29,7	35,59	59,12	3,5
2	255	26,9	44,46	60,36	3,51
3	255	29,5	50,36	60,3	3,51
4	235,3	29,7	47,51	58,81	3,5

Итак, при полной деформации образца (32 мм, т. е. 83 % от его общей толщины) нагрузка максимальна. Из графиков (рис. 1) видно, что в конце деформации имеет место сильный удар. Следует отметить, что для каждого образца опыт повторялся четыре раза, что отражено на рисунках (здесь и далее) кривыми синего, фиолетового, темно-зеленого и светло-зеленого цветов.



Рис. 1. Зависимости нагрузки и энергии удара от деформации образцов трехслойной упаковки общей толщиной 38,1 мм со стандартной сотовой структурой

Результаты испытаний двухслойных образцов упаковки общей толщиной 127 мм (толщина каждого слоя — 63,5 мм) представлены в табл. 2. Нагрузка действует вдоль соты.

Таблица 2

Результаты испытания образца упаковки со стандартной сотовой структурой толщиной 127 мм

№	Максимальная нагрузка, Н	Деформация при максимальной нагрузке, мм	Энергия удара при максимальной нагрузке, Дж	Суммарная энергия удара, Дж	Скорость, м/с
1	394,3	4,3	8,5	63,9	3,5
2	419,8	4,3	9	64,3	3,5
3	385,7	4,3	8,3	63,5	3,5
4	399,2	4,3	8,9	63,88	3,5

Графически зависимости отражены на рис. 2.

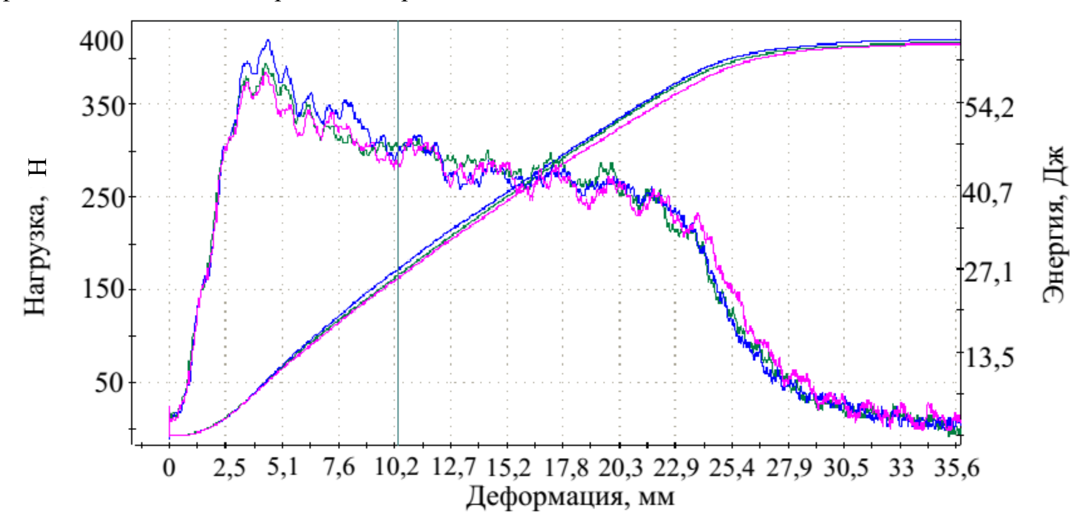


Рис. 2. Зависимости нагрузки и энергии удара от деформации образцов двухслойной упаковки общей толщиной 127 мм со стандартной сотовой структурой

Результаты показывают, что образец амортизировал энергию вертикального удара, деформировавшись при этом на 28 мм (22 % от общей толщины образца).

Испытания образцов картонной упаковки в три слоя (каждый слой толщиной 63,5 мм, общая толщина образца — 190,5 мм) показали худший результат. Вероятно, увеличение высоты соты (на треть по сравнению с предыдущим образцом) отрицательно повлияло на ее устойчивость.

Таким образом, при силовом воздействии вдоль соты лучшими амортизирующими свойствами обладает образец картонной упаковки в два слоя общей толщиной 127 мм (толщина каждого слоя — 63,5 мм).

Далее именно такая упаковка испытывалась для выяснения ее амортизирующих свойств при действии боковой нагрузки (поперек соты). Длина образцов составляла 160 мм. Цель испытаний — выявление наиболее рациональной структуры картона, одинаково эффективно амортизирующей как вертикальную, так и горизонтальную нагрузку.

Результаты представлены в табл. 3 и на рис. 3. Нагрузка действует поперек соты сначала с одной, а потом с другой стороны. В обоих случаях образцы деформировались полностью.

Таблица 3

Результаты испытания образца упаковки со стандартной сотовой структурой общей толщиной 127 мм

№	Максимальная нагрузка, Н	Деформация при максимальной нагрузке, мм	Энергия удара при максимальной нагрузке, Дж	Суммарная энергия удара, Дж	Скорость, м/с
1	214,5	134,62	59,34	71,3	3,5
2	213,8	133,12	58,75	70,8	3,2
3	214,3	134,43	59,29	71,1	3,3

На рис. 3 показан наихудший вариант.

Рис. 3. Зависимости нагрузки и энергии удара от деформации образцов двухслойной упаковки общей толщиной 127 мм со стандартной сотовой структурой при боковом ударе

Как видно из графика, удар не рассеян, при полной деформации образца имеет место сильный удар.

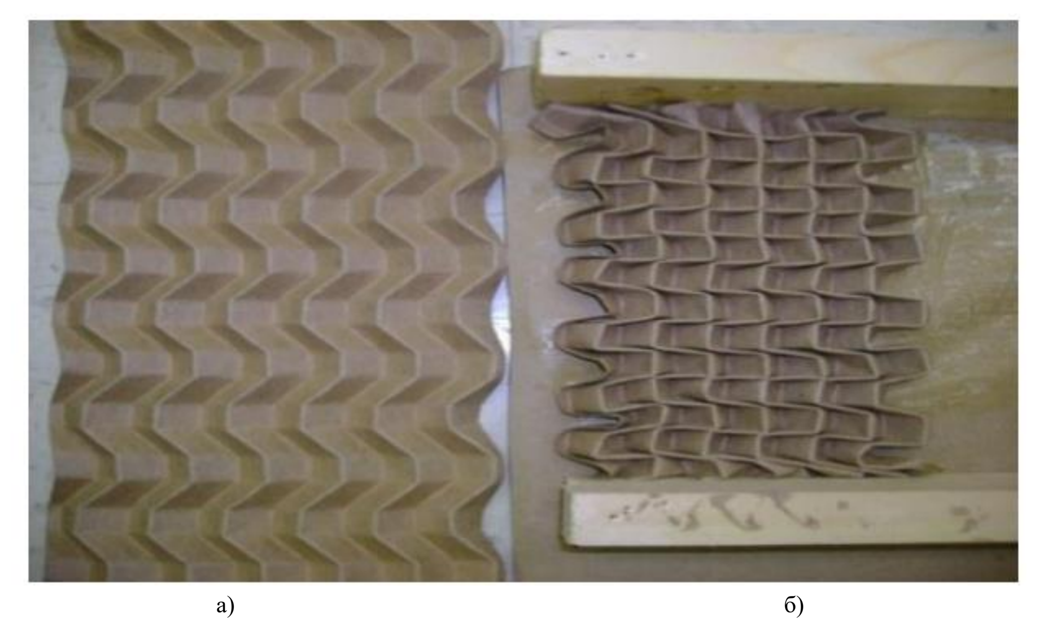
Анализ полученных результатов показывает, что сопротивление соты картонного образца поперечной нагрузке зависит от стороны, на которую придется удар. Разница в показателях существенна. В обоих случаях образцы разрушились.

На рис. 3 в точке деформации 160 мм энергия удара примерно соответствует 60 Дж, что недопустимо. Очевидно, что для создания эффективного образца картонной упаковки, способного амортизировать как поперечную, так и продольную соте нагрузку, необходимо менять структуру гофрирования. Для создания упаковки более эффективной, чем представленные выше, было решено изменить форму соты на М- и S-образную и применить их совместно [3, 6].

Для создания образцов с MS-профилем использовался силовой картон плотностью 0,06 гр/см^2. Данный материал широко используется в виде рулонов шириной 190 мм [10].

Рулон подготовленного картона устанавливается на раскате. (Конструкция раската включает рулонодержатель с приводом перемещения по высоте и по ширине закрепляемого рулона.) Затем картон поступает на разогрев и увлажнение, а после этого — к валам узла гофрирования. Здесь пластиковые вальцы постепенно формируют MS-профиль ячеек [11].

Затем гофрированный участок отрезается на необходимую длину, и путем сжатия образца происходит окончательное формирование профиля соты (рис. 4). После склеивания образцов заданной высоты производится подрезка в размер (127 × 127 мм), образец высушивается и взвешивается.



а) б)

Рис. 4. MS-профилированный картон: до сжатия (а), после сжатия (б)

Для испытаний было подготовлено 6 образцов разной толщины — с разным количеством слоев: один, два, три, пять, семь, девять. Один лист состоял из 24 слоев. Каждый эксперимент повторялся по три раза.

Исходя из проведенных ранее исследований [7], наибольший интерес представляют испытания трехслойного MS-образца. Результаты сведены в табл. 4.

Таблица 4

Результаты испытания образца трехслойной MS-упаковки общей толщиной 38,1 мм

№	Максимальная нагрузка, Н	Деформация при максимальной нагрузке, мм	Энергия удара при максимальной нагрузке, Дж	Суммарная энергия удара, Дж	Скорость, м/с
1	418	16,3	50,4	65,5	3,5
2	392,8	17,3	44,3	65,4	3,5
3	398,8	16,8	49,1	65,4	3,5

Графически эти данные представлены на рис. 5

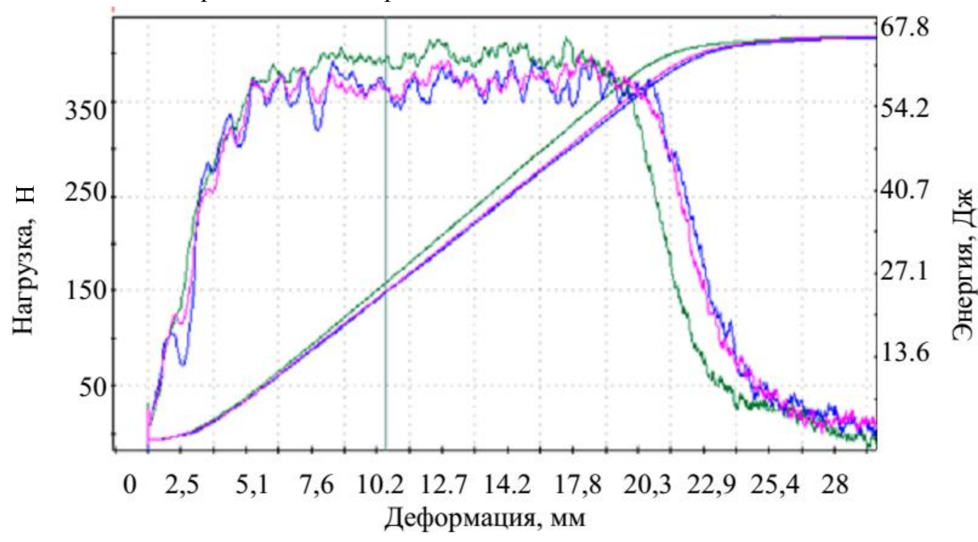


Рис. 5. Зависимости нагрузки и энергии удара от деформации трехслойного MS-образца общей толщиной 38,1 мм

Толщина образца достаточна, чтобы рассеять энергию удара. Деформация составила 73 % от общей толщины. Образец перспективен.

Результаты испытаний пятислойного MS-образца представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты испытания образца пятислойной MS-упаковки общей толщиной 51 мм

№	Максимальная нагрузка, Н	Деформация при максимальной нагрузке, мм	Энергия удара при максимальной нагрузке, Дж	Суммарная энергия удара, Дж	Скорость, м/с
1	327,3	15,5	33	66,5	3,5
2	349,7	11,2	25	66,7	3,5
3	313	15	32,1	67,2	3,5

Толщина образца достаточна, чтобы рассеять энергию удара. Деформация составила 65 % от общей толщины. Образец перспективен.

Высота девятислойного MS-образца сопоставима с высотой стандартного «сотового» образца общей толщиной 127 мм. Как уже говорилось ранее, это лучший по амортизирующим характеристикам образец стандартной упаковки с сотовой структурой.

Следующие испытания проводились для выяснения амортизирующих свойств картонной упаковки при действии боковой нагрузки. Образцы с MS-профилем показали хорошие результаты при амортизации боковой нагрузки. Исследования показали, что трех-, пяти- и девятислойный MS-образцы эффективно рассеивают нагрузки — как боковую, так и вдоль соты. Безусловно, следует учитывать существенную (90 граммов) разницу в весе между девятислойным и пятислойным образцами. При этом амортизирующие свойства пятислойного образца достаточны для рассеива-

ния комбинированной ударной нагрузки. Следовательно, исходя из соотношения цена/амортизация, наиболее рационально использование пятислойной MS-упаковки общей толщиной 51 мм. Деформировавшись на 33 мм, образец полностью рассеял энергию удара вдоль соты.

Выводы. Сравнивая амортизирующие и массово-габаритные характеристики испытанных образцов, можно сказать, что MS-профиль является перспективной альтернативой картонной упаковкой со стандартной сотовой структурой. Проведенные исследования показали эффективность применения гофрированного картона с MS-профилем в три и пять слоев по сравнению со стандартным сотовым картоном такой же толщины. Применение семи- и девятислойного картона нецелесообразно, т. к. при амортизации вертикальной и горизонтальной нагрузки его преимущество незначительно.

Библиографический список

1. Упаковка пищевых продуктов / под ред. Р. Коулза. — Санкт-Петербург : Профессия, 2008. — 416 с.

2. Heimbs, S. Honeycomb sandwich material modeling for dynamic simulations of aircraft interior components / S. Heimbs, P. Middendorf, M. Maier // Proceedings of the 9th international LS-DYNA users conference. — Dearborn, 2006. — P. 201–206.

3. Elsayd, E.-A. A Continuous Folding Process for Sheet Materials / E.-A. Elsayd, B.-B. Basily // International Journal of Materials & Product Technology. — 2004. — № 21 (1/2/3). — P. 217–238.

4. Антибас, И. Р. Сравнение амортизирующих свойств гофрированной картонной упаковки разной структуры при действии вертикальной нагрузки / И. Р. Антибас, С. А. Партко // Состояние и перспективы развития сельскохозяйственного машиностроения : сб. статей 8-й междунар. науч.-практ. конф. 3—6 марта 2015 г. в рамках 18-й междунар. агропром. выставки «Интерагромаш-2015». — Ростов-на-Дону, 2015. — С. 232–234.

5. Антибас, И. Р. Демпфирующие свойства гофрированного упаковочного картона сотовой структуры / И. Р. Антибас, С. А. Партко // Инновационные технологии в машиностроении и металлургии : сб. статей VII науч.-практ. конф. — Ростов-на-Дону, 2015. — С. 65–71.

6. Basily, B.-B. Developments in sheet folding technology and applications / B.-B. Basily, E.-A. Elsayd // Proceedings of 2004 the NSF Design, Service and Manufacturing Grantees and Research Conference. — Birmingham, Alabama. — 2004. — January. — P. 6–10.

7. Хенлон, Дж.-Ф. Упаковка и тара: проектирование, технологии, применение / Дж.-Ф. Хенлон, Р.-Дж. Келси, Х.-Е. Форсинио ; под общ. науч. ред. В.-Л. Жавнера. — Санкт-Петербург : Профессия, 2006. — 632 с.

8. Torre, L. Impact testing and simulation of composite sandwich structures / L. Torre, J.-M. Kenny // Composite Structures. — 2000. — Vol. 50, is. 3. — P. 257–256.

9. Impact response of integrated hollow core sandwich composite panels / U. K. Vaidya [et al.] // Composites. Part A : Applied Science & Manufacturing. — 2000. — № 31. — P. 761–772.

10. Ванчаков, М. В. Технологическое оборудование для производства картонной и бумажной тары / М. В. Ванчаков, П. М. Кейзер, В. К. Дубовый. — Санкт-Петербург : ГТУРП, 2014. — 133 с.

11. Bangay, S. From virtual to physical reality with paper folding / S. Bangay // Computational Geometry: Theory and Applications. — 2000. — № 15. — P. 161–174.

References

1. Coles, R., ed. Upakovka pishchevykh produktov. [Food Packaging Technology.] St. Petersburg: Professiya, 2008, 416 p. (in Russian).

2. Heimbs, S. Middendorf, P., Maier, M. Honeycomb sandwich material modeling for dynamic simulations of aircraft interior components. Proceedings of the 9th international LS-DYNA users conference. Dearborn, 2006, pp. 201–206.

3. Elsayd, E.-A., Basily, B.-B. A Continuous Folding Process for Sheet Materials. International Journal of Materials & Product Technology, 2004, no. 21 (1/2/3), pp. 217–238.

4. Antypas, I. R., Partko, S.A. Sravnenie amortiziruyushchikh svoystv gofrirovannoy kartonnoy upakovki raznoy struktury pri deystvii vertikal'noy nagruzki. Sravnenie amortiziruyushchikh svoystv gofrirovannoy kartonnoy upakovki raznoy struktury pri deystvii vertikal'noy nagruzki [Comparison of damping properties of corrugated cardboard packaging of various structures under vertical load action.] Sostoyanie i perspektivy razvitiya sel'skokhozyaystvennogo mashinostroeniya: sb. statey 8-y mezhdunar. nauch.-prakt. konf. 3—6 marta 2015 g. v ramkakh 18-y mezhdunar. agroprom. vystavki «Interagromash-2015». [State and prospects of development of agricultural machinery: Proc. 8th Int. Sci.-Pract. Conf. 3-6 March, 2015, within the framework of the 18th Int. Agro-industrial Exhibition “Interagromash-2015”.] Rostov-on-Don, 2015, pp. 232–234 (in Russian).

5. Antypas, I. R., Partko, S.A. Dempfiruyushchie svoystva gofrirovannogo upakovochnogo kartona sotovoy struktury. [Damping properties of the corrugated honeycomb packaging board.] Innovatsionnye tekhnologii v mashinostroenii i

metallurgii : sb. statey VII nauch.-prakt. konf. [Innovative technologies in machine building and metallurgy: Proc. VII Sci.-Pract. Conf.] Rostov-on-Don, 2015, pp. 65–71 (in Russian).

6. Basily, B.-B., Elsayd, E.-A. Developments in sheet folding technology and applications. Proceedings of 2004 the NSF Design, Service and Manufacturing Grantees and Research Conference. Birmingham, Alabama, 2004, January, pp. 6–10.

7. Hanlon, J.F., Kelsey, R.J., Forcinio, H.; Zhavner, V.L., ed. Upakovka i tara: proektirovanie, tekhnologii, primenenie. [Packaging and containers: designing, technologies, application.] St. Petersburg: Professiya, 2006, 632 p. (in Russian).

8. Torre, L., Kenny, J.-M. Impact testing and simulation of composite sandwich structures. Composite Structures, 2000, vol. 50, iss. 3, pp. 257–256.

9. Vaidya, U.K., et al. Impact response of integrated hollow core sandwich composite panels. Composites. Part A: Applied Science & Manufacturing, 2000, no. 31, pp. 761–772.

10. Vanchakov, M.V., Keyzer, P.M., Dubovy, V.K. Tekhnologicheskoe oborudovanie dlya proizvodstva kartonnoy i bumazhnoy tary. [Technological equipment for cardboard and paper packaging production.] St. Petersburg: GTURP, 2014, 133 p. (in Russian).

11. Bangay, S. From virtual to physical reality with paper folding. Computational Geometry: Theory and Applications, 2000, no. 15, pp. 161–174.

Поступила в редакцию 09.09.2015
Сдана в редакцию 09.09.2015
Запланирована в номер 22.01.2016

МЕХАНИКА
MECHANICS



УДК 539.3 DOI 10.12737/18157

О критических нагрузках сжатой упругой прямоугольной пластины с дислокациями и дисклинациями *

И. М. Пешхоев[1] **

[1] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

On critical loads of compressed elastic rectangular plate with dislocations and disclinations ***

I. M. Peshkhoev[1]**

[1] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Рассматривается задача о критических нагрузках сжатой прямоугольной пластины, содержащей непрерывно распределенные источники собственных напряжений. Анализ задачи проводится на основе модификации системы нелинейных уравнений Кармана для больших прогибов упругих пластин с дислокациями и дисклинациями с различными вариантами краевых условий. Введением замены для функции напряжений задача сводится к исследованию двух задач: линейной краевой задачи относительно функции напряжений, вызванных внутренними источниками и системы нелинейных уравнений относительно прогиба и функции напряжений, вызванных внешними сжимающими нагрузками, которая имеет тривиальное решение. Классическая критическая нагрузка определяется как наименьшее собственное значение линейной краевой задачи, полученной линеаризацией системы нелинейных уравнений относительно тривиального решения. Рассматриваются четыре типа краевых условий: все края подвижно защемлены; все края шарнирно оперты; два противоположных края свободны от напряжений, а два других подвижно защемлены или шарнирно оперты. Равномерно распределенные сжимающие нагрузки одинаковы на противоположных краях. Установлено, что если мера несовместности является нечетной по одной переменной и четной или нечетной по другой переменной, то напряжения, вызванные только внутренними источниками, не приводят к потере устойчивости плоского равновесного состояния и не влияют на критические значения сжимающих нагрузок.

Ключевые слова: упругая пластина, дислокации и дисклинации, критическая нагрузка.

A problem on critical loads of the compressed rectangular plate containing continuously distributed sources of inherent stress is considered. The task analysis is based on the modification of the Karman nonlinear equations system for large deflections of elastic plates with dislocations and disclinations under different boundary conditions. By the introduction of a replacement for the stress function, the problem reduces to the treatment of two tasks: a linear boundary value problem concerning the stress function caused by internal sources and a system of nonlinear equations concerning the deflection and the stress function caused by external compressive loads, which possesses a trivial solution. The classical critical load is defined as the smallest eigenvalue of the linear boundary value problem obtained by the linearization of the nonlinear equations system relative to the trivial solution. Four types of boundary conditions are treated: all edges are variably restrained; all edges are simply supported; two opposite edges are stress-free, and the other two are either variably restrained or simply supported. Uniformly distributed compressive loads are equal on the opposite edges. It is established that if the measure of inconsistency is odd on one variable and odd or even on another variable, then the stresses caused only by internal sources, do not lead to the loss of the flat equilibrium state and do not affect the critical values of compressive loads.

Keywords: elastic plate, dislocations and disclinations, critical load.

Введение. В работе Л. М. Зубова [1] на основе уравнений Кармана построена система нелинейных уравнений равновесия упругих пластин, содержащих внутренние источники напряжений, вызванных дислокациями и дисклинациями. Рассмотрена задача об изгибе мембраны вследствие релаксации вызванных дефектами внутренних напряжений, которая сведена к уравнению Монжа-Ампера. Найдено несколько точных решений о форме поверхности мембраны, содержащей распределенные дисклинации. В [2] рассмотрена задача о влиянии внутренних напряжений на

* Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 14-08-00142_A).
** E-mail: peshkhoev@rambler.ru
*** The research is done with the financial support from RFFI (project 14-08-00142_A).

прогибы и напряженное состояние круглой упругой пластины, испытывающей поперечное давление. Установлено, что наличие дисклинаций приводит к нелинейному увеличению прогиба. Исследованы задачи об устойчивости и послекритическом поведении нагруженной контурным давлением круглой пластины с непрерывно распределенными дисклинациями. Найдены вызванные дисклинациями осесимметричные закритические формы изгиба пластинки, которые существуют при отсутствии внешней нагрузки. Установлено, что при переходе пластинки из плоского состояния в изогнутую форму уменьшается величина внутренних напряжений.

В работе В. А. Треногина [3] был развит метод Ляпунова–Шмидта в операторной форме для нелинейных уравнений в банаховых пространствах. В работе [4] Л. С. Срубщик и В. А. Треногин исследовали задачу о влиянии малой поперечной нагрузки на выпучивание и послекритическое поведение пластины произвольной формы под действием параллельных осям координат сжимающих краевых усилий.

В работе Рейсснера [5] рассмотрена задача о влиянии нелинейно-упругого основания на выпучивание и начальное послекритическое поведение безмоментного плоско-напряженного состояния в случае бесконечной пластины с малыми геометрическими несовершенствами, а в случае тонкой сжатой пластины строго выпуклой формы со свободным краем при дополнительном действии малой поперечной нагрузки эта задача решена Л. С. Срубщиком [6]. В работах [7, 8] исследована задача о влиянии малой поперечной нагрузки на послекритическое поведение прямоугольной гибкой пластины, лежащей на нелинейно-упругом основании и равномерно сжатой в продольном направлении, а в [9] эта же задача рассмотрена для пластины с дислокациями и дисклинациями. С помощью операторного метода Ляпунова–Шмидта определено количество решений, соответствующих новым формам равновесий, и для каждого из них строятся асимптотические представления.

1. Постановка задач

1. 1. Система уравнений равновесия и краевые условия. Пусть тонкая упругая прямоугольная пластина, содержащая в плоском состоянии поля непрерывно распределенных краевых дислокаций и клиновых дисклинаций, находится под действием малой нормальной нагрузки интенсивности $\xi G(X,Y)$ и внешнего краевого усилия, составляющие которого вдоль осей X и Y равны соответственно P и Q. Тогда система уравнений равновесия записывается в виде [1, 10]

$$\begin{cases} D\Delta^2 W = [\Psi, W] + \xi G \\ \Delta^2\Psi + Eh[W,W]/2 = Eh\mu \end{cases} \tag{1.1}$$

$$D = Eh^3/12(1-\nu^2), [\Psi, W] \equiv W_{XX}\Psi_{YY} - 2W_{XY}\Psi_{XY} + W_{YY}\Psi_{XX}$$

Здесь

$\mu(X,Y)$ — скалярная мера несовместности, которая выражается через плотности дислокаций и дисклинаций, $W(X,Y)$ — прогиб пластины, $\Psi(X,Y)$ — функция напряжений Эри, h — толщина пластины, ν — коэффициент Пуассона, E — модуль Юнга, X, Y — прямоугольные координаты с началом в центре пластины и осями, параллельными ее краям, ξ — малый числовой параметр.

Систему (1.1) будем исследовать с краевыми условиями одного из следующих типов [9, 10]

$$\begin{cases} W = W_X = \Psi_{XY} = 0, \Psi_{YY} = -P, |X| = a/2, |Y| < b/2 \\ W = W_Y = \Psi_{XY} = 0, \Psi_{XX} = -Q, |Y| = b/2, |X| < a/2 \end{cases} \tag{1.2}$$

$$\begin{cases} W = W_{XX} = \Psi_{XY} = 0, \Psi_{YY} = -P, |X| = a/2, |Y| < b/2 \\ W = W_{YY} = \Psi_{XY} = 0, \Psi_{XX} = -Q, |Y| = b/2, |X| < a/2 \end{cases} \tag{1.3}$$

$$\begin{cases} W = W_X = \Psi_{XY} = 0, \Psi_{YY} = -P, |X| = a/2, |Y| < b/2 \\ W_{YY} + \nu W_{XX} = W_{YYY} + (2-\nu) W_{XXY} = \Psi_{XY} = \Psi_{XX} = 0, |Y| = b/2, |X| < a/2 \end{cases} \tag{1.4}$$

$$\begin{cases} W = W_{XX} = \Psi_{XY} = 0, \Psi_{YY} = -P, |X| = a/2, |Y| < b/2 \\ W_{YY} + \nu W_{XX} = W_{YYY} + (2-\nu) W_{XXY} = \Psi_{XY} = \Psi_{XX} = 0, |Y| = b/2, |X| < a/2 \end{cases} \tag{1.5}$$

Краевые условия (1.2) отвечают свободному защемлению, а (1.3) — подвижной шарнирной опоре краев. Сжимающие усилия равномерно распределены по краям $X = \pm a/2$ и $Y = \pm b/2$ соответственно. Условия для $|Y| = b/2$ в (1.4) и (1.5) соответствуют свободному краю. В этих случаях сжимающие усилия приложены только к краям $X = \pm a/2$.

Пусть $\Psi = \Phi - PY^2/2 - QX^2/2$. Тогда функция Φ удовлетворяет однородным краевым условиям $\Phi_{XY} = \Phi_{YY} = 0$ при $|X| = a/2$, $\Phi_{XY} = \Phi_{XX} = 0$ при $|Y| = b/2$. Заменяя эти условия на эквивалентные $\Phi = \Phi_X = 0$ при $|X| = a/2$, $\Phi = \Phi_Y = 0$ при $|Y| = b/2$, перепишем систему уравнений (1.1) и краевые условия (1.2) — (1.5) в виде

$$\begin{cases} D\Delta^2 W + PW_{XX} + QW_{YY} = [\Phi, W] + \xi G \\ \Delta^2\Phi + Eh[W,W]/2 = Eh\mu \end{cases} \tag{1.6}$$

$$\begin{cases} W = W_X = \Phi = \Phi_X = 0, |X| = a/2, |Y| < b/2 \\ W = W_Y = \Phi = \Phi_Y = 0, |Y| = b/2, |X| < a/2 \end{cases} \tag{1.7}$$

$$\begin{cases} W = W_{XX} = \Phi = \Phi_X = 0, |X| = a/2, |Y| < b/2 \\ W = W_{YY} = \Phi = \Phi_Y = 0, |Y| = b/2, |X| < a/2 \end{cases} \tag{1.8}$$

$$\begin{cases} W = W_X = \Phi = \Phi_X = 0, |X| = a/2, |Y| < b/2 \\ W_{YY} + \nu W_{XX} = W_{YYY} + (2-\nu)W_{XXY} = \Phi = \Phi_Y = 0, |Y| = b/2, |X| < a/2 \end{cases} \tag{1.9}$$

$$\begin{cases} W = W_{XX} = \Phi = \Phi_X = 0, |X| = a/2, |Y| < b/2 \\ W_{YY} + \nu W_{XX} = W_{YYY} + (2-\nu)W_{XXY} = \Phi = \Phi_Y = 0, |Y| = b/2, |X| < a/2 \end{cases} \tag{1.10}$$

В случае краевых условий (1.9) или (1.10) считаем, что $Q = 0$ в (1.6).

1.2. Переход к безразмерным переменным. В (1.6) — (1.10) перейдем к безразмерным переменным по формулам

$$\begin{aligned} &X = ax, Y = by, W(X,Y) = w(x,y)h/\gamma, \Phi(X,Y) = D\overline{F}(x,y) \\ &P = Dp/b^2, Q = Dq/(\alpha a^2), G(X,Y) = hdg(x,y)/(\gamma b^4) \\ &\alpha = b^2/a^2, \mu = \overline{\mu}\gamma^2/h^2 \end{aligned} \tag{1.11}$$

С учетом (1.11) система (1.6) преобразуется к виду

$$\begin{cases} \Delta_\alpha^2 w + p\alpha w_{xx} + qw_{yy} = \alpha[w, \overline{F}] + \xi g \\ \Delta_\alpha^2 \overline{F} + \alpha[w,w]/2 = \overline{\mu}, \quad |x| < 1/2, \quad |y| < 1/2, \end{cases} \tag{1.12}$$

$$\Delta_\alpha(\ ) \equiv (\ )_{yy} + \alpha(\ )_{xx}, \quad \Delta_\alpha^2 = \Delta_\alpha\Delta_\alpha$$

Введем числовой параметр r такой, что $\overline{\mu}(x,y) = r\mu_1(x,y)$, где $\mu_1(x,y)$ фиксированная функция. Обозначим через F_1 решение краевой задачи

$$\Delta_\alpha^2 F = \mu_1(x,y), \tag{1.13}$$

$$\begin{aligned} &F = F_x = 0, |x| = 1/2, |y| < 1/2 \\ &F = F_y = 0, |y| = 1/2, |x| < 1/2 \end{aligned} \tag{1.14}$$

Тогда решением задачи $\Delta_\alpha^2 F = \overline{\mu}(x,y)$ с краевыми условиями (1.14) будет функция $F_\mu = rF_1$. Назовем переменную r параметром интенсивности напряжений, вызванных внутренними источниками пластины.

Положим $\overline{F} = rF_1 + F$. Учитывая (1.11) — (1.14), выводим краевые задачи

$$\begin{cases} \Delta_\alpha^2 w + p\alpha w_{xx} + qw_{yy} = \alpha[w,F] + r\alpha[w,F_1] + \xi g \\ \Delta_\alpha^2 F + \alpha[w,w]/2 = 0, \quad |x| < 1/2, \quad |y| < 1/2, \end{cases} \tag{1.15}$$

$$\begin{cases} w = w_x = 0, |x| = 1/2, |y| < 1/2 \\ w = w_y = 0, |y| = 1/2, |x| < 1/2 \end{cases} \tag{1.16}$$

$$\begin{cases} w = w_{xx} = 0, |x| = 1/2, |y| < 1/2 \\ w = w_{yy} = 0, |y| = 1/2, |x| < 1/2 \end{cases} \tag{1.17}$$

$$\begin{cases} w = w_x = 0, |x| = 1/2, |y| < 1/2 \\ w_{yy} + \nu\alpha w_{xx} = w_{yyy} + (2-\nu)\alpha w_{xxy} = 0, |y| = 1/2, |x| < 1/2 \end{cases} \tag{1.18}$$

$$\begin{cases} w = w_{xx} = 0, |x| = 1/2, |y| < 1/2 \\ w_{yy} + \nu\alpha w_{xx} = w_{yyy} + (2-\nu)\alpha w_{xxy} = 0, |y| = 1/2, |x| < 1/2 \end{cases} \tag{1.19}$$

Функция F в (1.15) должна удовлетворять краевым условиям (1.14).

При $\xi = 0$ краевая задача (1.15) с каждым из краевых условий (1.16) — (1.19) при всех значениях параметров *p, q, r* имеет тривиальное решение $(w_*, F_*) = (0,0)$.

2. Критические нагрузки выпучивания основного равновесия

2.1. Исследование линеаризованных задач. В работе [9] с использованием результатов [11–13] показано, что критические нагрузки выпучивания основного равновесия определяются из линейной краевой задачи на собственные значения

$$\Delta_\alpha^2\omega + q\omega_{yy} - r\alpha[\omega, F_1] = -p\alpha\omega_{xx} \tag{2.1}$$

с параметрами q, r и одним из следующих краевых условий

$$\begin{cases} \omega = \omega_x = 0, |x| = 1/2, |y| < 1/2 \\ \omega = \omega_y = 0, |y| = 1/2, |x| < 1/2 \end{cases} \tag{2.2}$$

$$\begin{cases} \omega = \omega_{xx} = 0, |x| = 1/2, |y| < 1/2 \\ \omega = \omega_{yy} = 0, |y| = 1/2, |x| < 1/2 \end{cases} \tag{2.3}$$

$$\begin{cases} \omega = \omega_x = 0, |x| = 1/2, |y| < 1/2 \\ \omega_{yy} + \nu\alpha\omega_{xx} = \omega_{yyy} + (2-\nu)\alpha\omega_{xxy} = 0, |y| = 1/2, |x| < 1/2 \end{cases} \tag{2.4}$$

$$\begin{cases} \omega = \omega_{xx} = 0, |x| = 1/2, |y| < 1/2 \\ \omega_{yy} + \nu\alpha\omega_{xx} = \omega_{yyy} + (2-\nu)\alpha\omega_{xxy} = 0, |y| = 1/2, |x| < 1/2 \end{cases} \tag{2.5}$$

Здесь в случае краевых условий (2.4) или (2.5) в уравнении (2.1) полагается $q = 0$.

Введем линейные операторы *A* и *B*

$$A\omega \equiv \Delta_\alpha^2\omega + q\omega_{yy} - r\alpha[\omega, F_1],\ B\omega \equiv -\alpha\omega_{xx} \tag{2.6}$$

Задачи на собственные значения (2.1) с краевыми условиями (2.2–2.5) в случае $r = 0$ исследованы, где показано, что оператор A формально самосопряжен и ограничен снизу [14]. Формальная самосопряженность оператора *A* в случае $r \neq 0$ следует из равенства

$$\iint_\Omega [\omega, F]\omega dxdy = \iint_\Omega [\omega, \omega] F dxdy$$

где функция ω удовлетворяют одному из краевых условий (2.2)–(2.5), а функция F—условиям (1.14). Ограниченность снизу оператора *A* в случае $r \neq 0$ следует из неравенства

$$\left|\iint_\Omega [\omega, F]\omega dxdy\right| = \left|\iint_\Omega [\omega, \omega] F dxdy\right| \le c\left|\iint_\Omega \omega\Delta_\alpha^2\omega\, dxdy\right|$$

которое следует из неравенств Фридрихса [14].

Так как в задаче на собственные значения (2.1) оператор A формально самосопряжен и ограничен снизу, а оператор *B* положительно определен [13], то можно применять результаты §§39, 40, 44 из [15] и свести задачу к минимизации функционала

$$J(\omega) = \frac{(A\omega, \omega)}{(B\omega, \omega)},\ (u, v) \equiv \iint_\Omega uv dxdy, \tag{2.7}$$

где функция ω удовлетворяет одному из краевых условий (2.2)–(2.5). Приходим к следующему алгоритму [14, 16]. Пусть известны первые собственные значения $p_1 \le p_2 \le \dots p_{n-1}$ и соответствующие собственные функции $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{n-1}$ задачи (2.4) при заданных значениях параметров q и r. Задаем начальное приближение $\omega_n^{(0)}$ к собственной функции ω_n. Для I = 0,1… выполняем следующие действия

1) вычисляем $(i+1)$ – е приближение к собственному значению p_n

$$p_n^{(i+1)} = J\left(\omega_n^{(i)}\right) \tag{2.8}$$

2) находим $\widetilde{\omega}_n^{(i+1)}$ из уравнения

$$A\widetilde{\omega}_n^{(i+1)} = p_n^{(i+1)} B\omega_n^{(i)} \tag{2.9}$$

при соответствующих краевых условиях из (2.5)–(2.8);

3) ортогонализируем решение $\widetilde{\omega}_n^{(i+1)}$ к первым $n-1$ собственным функциям по энергии оператора *B*

$$\overline{\omega}_n^{(i+1)} = \widetilde{\omega}_n^{(i+1)} - \sum_{j=1}^{n-1} \omega_j \left(B\widetilde{\omega}_n^{(i+1)}, \omega_j\right) \Big/ \left(B\omega_j, \omega_j\right) \tag{2.10}$$

4) вводим функцию $\omega_n^{(i+1)}$

$$\omega_n^{(i+1)} = \overline{\omega}_n^{(i+1)} \Big/ \left\| \overline{\omega}_n^{(i+1)} \right\|, \ \|\omega\| \equiv \max_{(x,y)\in\Omega} |\omega(x,y)| \tag{2.11}$$

Этот процесс повторяется до тех пор, пока не будет выполнено условие сходимости $\left| p_n^{(i+1)} - p_n^{(i)} \right| \le \varepsilon$, где ε – заданная погрешность.

Критическое значение параметра r_0 определяется как наименьшее собственное значение задачи

$$\Delta_\alpha^2 \omega + p\alpha\omega_{xx} + q\omega_{yy} = r\alpha[\omega, F_1] \tag{2.12}$$

при заданных значениях параметров p и q с каждым из краевых условий (2.2–2.5) (в случаях (2.4), (2.5) полагается $q = 0$). Если в (2.12) $p = q = 0$, то при $r = r_0$ пластина теряет устойчивость плоского равновесного состояния под действием только внутренних источников напряжений.

Для решения задачи (2.12) применяется минимизация функционала (2.7), где операторы А и В определяются по формулам

$$A\omega \equiv \Delta_\alpha^2 \omega + p\,\alpha\,\omega_{xx} + q\,\omega_{yy}, \ B\omega \equiv \alpha[\omega, F_1] \tag{2.13}$$

Здесь оператор *A* ограничен снизу [15], а знакоопределенность оператора *B* зависит от свойств функции F_1, т.е. от свойств меры несовместности $\mu_1(x,y)$.

В силу симметрии краевых условий (2.2)–(2.5) относительно начала координат при условии четности или нечетности функции F_1 по каждой переменной собственные функции ω задач (2.1) и (2.12) являются соответственно четными или нечетными по каждой переменной. Отсюда следует, что если функция F_1 является нечетной по одной переменной и четной или нечетной по другой переменной, то для оператора *B* в (2.13) справедливо

$$(B\omega, \omega) = \alpha \iint_\Omega [\omega, F_1]\omega\,dxdy = \alpha \iint_\Omega [\omega, \omega] F_1\,dxdy = 0 \tag{2.14}$$

и для оператора *A* в (2.6) имеем

$$(A\omega, \omega) = \left(\Delta_\alpha^2 \omega + q\omega_{yy} - r\alpha[\omega, F_1], \omega\right) = \left(\Delta_\alpha^2 \omega + q\omega_{yy}, \omega\right) \tag{2.15}$$

Из (2.14), (2.15) следует, что задача (2.12) имеет только тривиальное решение $\omega = 0$, а в задаче (2.1) собственные значения не зависят от параметра r. Это означает, что если мера несовместности $\mu_1(x,y)$ является нечетной по одной переменной и четной или нечетной по другой переменной, то напряжения, вызванные внутренними источниками, не приводят к потере устойчивости плоского равновесного состояния и не влияют на критические значения сжимающих нагрузок *p* и *q*.

Если функция F_1 такова, что оператор *B* в (2.13) положительно определен, то задача (2.12) разрешима методом минимизации функционала (2.7), т.е. критическое значение $r = r_0$ существует.

В данной работе для каждой конкретной функции F_1, являющейся решением задачи (1.13), (1.14) при заданной мере несовместности $\mu_1(x,y)$ существование решения задачи (2.12) определялось численными экспериментами, т.е. проверялась сходимость алгоритма (2.8)–(2.11), где вместо параметра p_n используется r_n, а операторы *A* и *B* определены формулами (2.13). Полученные при заданных значениях параметров $p = p_0$, $q = q_0$ собственное значение r_0 и собственная функция ω_0 задачи (2.12) сверялись с собственным значением p_* и собственной функцией ω_* задачи (2.1) при заданных значениях $r = r_0$, $q = q_0$. Во всех случаях сходимости алгоритма (2.8)–(2.11) наблюдалось $p_* \approx p_0$ и $\omega_* \approx \omega_0$ с погрешностью менее 0,001.

2.2. Результаты численных расчетов. Для краевых условий (2.3) решения уравнения (2.1) при $r = 0$ выписываются явно [10]

$$p_{m,n} = \left[\pi^4 \left(\alpha m^2 + n^2\right)^2 - q\pi^2 n^2\right] \Big/ \left(\alpha\pi^2 m^2\right) \tag{2.16}$$

$$\omega_{m,n} = \sin(\pi m(x+0{,}5))\sin(\pi n(y+0{,}5)) \quad (2.17)$$

где *m, n* — натуральные числа. Для остальных краевых условий при $r=0$ и для всех краевых условий при $r \neq 0$ задача (2.1) решалась по алгоритму (2.8)–(2.11) с применением разностного метода и квадратурной формулы Симпсона.

Формулы (2.16), (2.17) использовались в тестовых расчетах при отладке программ. Из (2.16) следует, что при $r=0$ и $q = \pi^2(1-4\alpha^2)/\alpha$, $0<\alpha<1/2$ минимальному собственному значению $p_{\min} = p_{1,1} = p_{2,1} = \pi^2(5\alpha+2)/\alpha$ отвечают две собственные функции $\omega_{1,1}$ — четная по обеим переменным, и $\omega_{2,1}$— нечетная по переменной x, четная по переменной y.

Рассмотрим случай постоянной меры несовместности, т.е. в задаче (1.13) $\mu_1(x,y)=1$. Тогда решение задачи (1.13), (1.14) — функция F_1 является четной по обеим переменным, что подтверждается численным решением этой задачи разностным методом. На рис.1 для случая квадратной пластины приведены графики функции F_1 и её вторых производных $F_{1,xx}$, $F_{1,xy}$, $F_{1,yy}$, которые позволяют судить о распределении напряжений, обусловленных внутренними источниками.

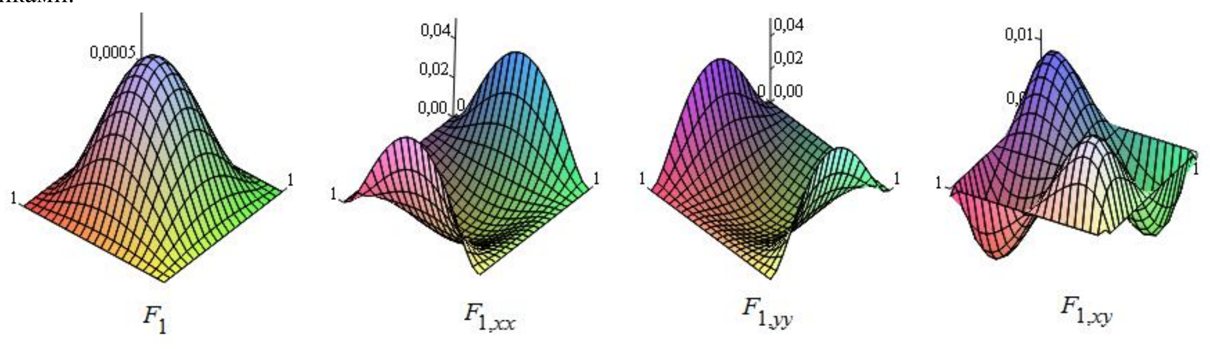


Рис.1. Графики функции F_1 и её вторых производных $F_{1,xx}$, $F_{1,yy}$, $F_{1,x,y}$

С помощью численных экспериментов найдены критические значения параметров нагрузок *p, q, r* которым отвечают одна или две собственные функции при различных значениях геометрического параметра $\alpha = b^2/a^2$ и краевых условиях (2.2)–(2.5). Отметим основные результаты для прямоугольных пластин при $\alpha = 1/4$, 1, 4. Для случая $r=r_0$, $p=0$, $q=0$ (пластина теряет устойчивость плоского равновесного состояния под действием только внутренних источников напряжений) установлено, что для закрепленной по краям платины (условия (2.5), (2.6)) $r_0>0$, а для пластины с двумя свободными краями (условия (2.4), (2.5)) $r_0<0$. На рис.2 приведены графики первой и второй собственных функций задачи (2.12) с условиями (2.4) для квадратной пластины при $p=0$, $q=0$.

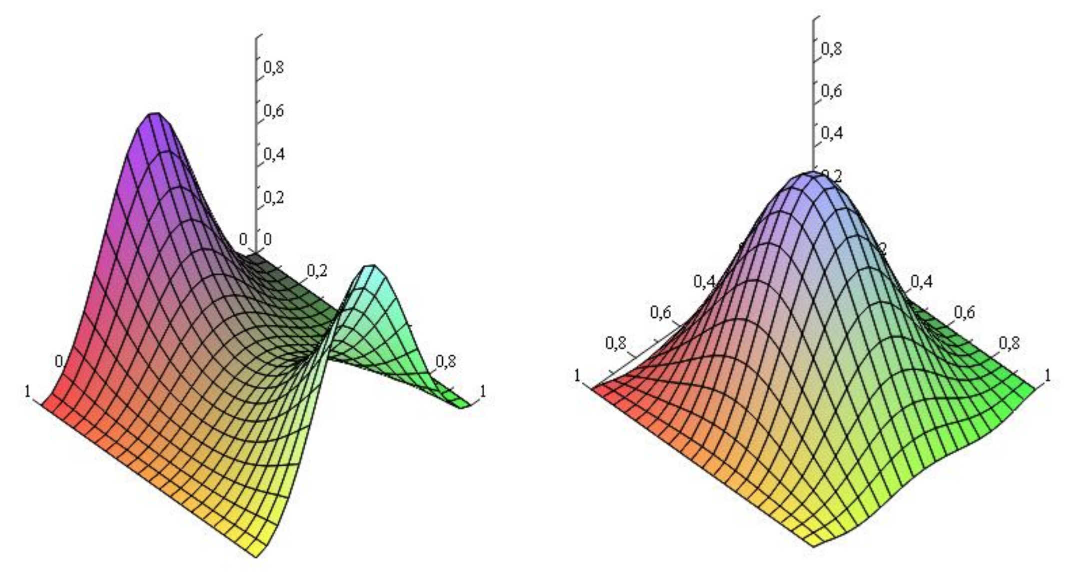


Рис.2. Графики первой и второй собственных функций задачи (2.12) с условиями (2.4) для квадратной пластины

В табл.1 приведены значения первого и второго собственных значений r_1, r_2 задачи (2.12) с условиями (2.4) для квадратной пластины при различных значениях параметра p $(q=0)$.

Таблица 1

Собственные значения r_1, r_2 задачи (2.12) с условиями (2.4)

p	r_1	r_2
0	-3794	3719
7,73	-3282	3334
15,45	-2741	2910
23,17	-2123	2424
30,89	-1371	1812
38,62	0,11	590

В табл. 2 приведены критические значения r_0 для $p=q=0$ при различных значения параметра $\alpha = b^2/a^2$, $a=1$ и краевых условиях (2.2) – (2.5).

Таблица 2

Критические значения r_0 для $p=q=0$

Краевые условия	$\alpha = 1/4$	$\alpha = 1$	$\alpha = 4$
(2.2)	40807	4354	2550
(2.3)	27856	2595	1740
(2.4)	-16997	-3794	-3088
(2.5)	-10166	-2120	-1708

Заключение.

1) Для рассматриваемого в работе случая симметрии краевых условий относительно начала координат установлено, что если мера несовместности является нечетной по одной переменной и четной или нечетной по другой переменной, то напряжения, вызванные внутренними источниками, не приводят к потере устойчивости плоского равновесного состояния и не влияют на критические значения сжимающих нагрузок.

2) Для постоянной меры несовместности на примере квадратной пластины при различных значениях сжимающей нагрузки численными экспериментами показано существование положительных и отрицательных критических значений параметра интенсивности напряжений, вызванных внутренними источниками (табл.1).

Автор благодарит профессоров Л. М. Зубова и Л. С. Срубщика за помощь в работе.

Библиографический список

1. Зубов, Л. М. Уравнения Кармана для упругой пластинки с дислокациями и дисклинациями // Доклады РАН. — 2007. — Т.412, № 3. — С. 343–346.

2. Зубов, Л. М. Сильный изгиб круглой пластинки с непрерывно распределенными дисклинациями / Л. М. Зубов, Т. Х. Фам // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. — 2010. № 4. — С. 28–33.

3. Треногин, В. А. Разветвление решений нелинейных уравнений в банаховом пространстве / В. А. Треногин // Успехи матем. наук. — 1958. — Т. 13. Вып. 4.

4. Срубщик, Л. С. О выпучивании гибких пластин / Л. С. Срубщик, В. А. Треногин // ПММ. — 1968. — Т. 32. Вып.4. — С. 721–727.

5. Reissner E. On Postbuckling Behavior and imperfection sensitivity of Thin Elastic Plates on a Non-linear Elastic Foundation / E. Reissner // Studies in Appl. Math. — 1970. — Vol. XLIX, N. 1. — P. 45–57.

6. Срубщик, Л. С. Краевой эффект и выпучивание тонких пластин на нелинейно-упругом основании / Л. С. Срубщик // Дифференциальные уравнения. — 1985. — Т. XXI, № 10. — С.1790–1794.

7. Пешхоев, И. М. Выпучивание и послекритическое поведение сжатой прямоугольной пластины на нелинейно-упругом основании / И. М. Пешхоев, Л. С. Срубщик. — Ростов-на-Дону, 1983. — 17 с. — Деп. в ВИНИТИ 07.83, № 4037–83.

8. Баул А. В. Влияние начальных несовершенств на выпучивание продольно сжатых прямоугольных цилиндрических панелей и пластин / А. В. Баул, И. М. Пешхоев, Л. С. Срубщик // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. — 1986. — № 1. — С.34–37.

9. Пешхоев, И. М. Ветвление равновесий сжатой упругой прямоугольной пластины с дислокациями и дисклинациями / И. М. Пешхоев // XI всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики, сб. докл., Казань, 20 – 24 августа 2015 г., — С. 2989–2991.

10. Тимошенко, С. П. Пластинки и оболочки / С. П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. — Москва : Физматгиз, — 1966. — 636 с.

11. Ворович, И. И. Математические проблемы нелинейной теории пологих оболочек/ И. И. Ворович. — Москва : Наука, 1989. — 376 с.

12. Морозов, Н. Ф. К нелинейной теории тонких пластин / Н. Ф. Морозов // Доклады АН СССР. — 1957. — Т.114, № 5. — С. 968–671.

13. Вайнберг, М. М. Теория ветвления решений нелинейных уравнений / М. М. Вайнберг, В. А. Треногин. — Москва : Наука, 1969. — 528с.

14. Пешхоев, И. М. Асимптотика и ветвление равновесий сжатых упругих прямоугольных пластин и стержней на нелинейно упругом основании : диссерт. … к-та физ.-мат. наук / И. М. Пешхоев. — Ростов-на-Дону, 1991. — 146с.

15. Михлин, С. Г. Вариационные методы в математической физике / С. Г. Михлин. — Москва : Наука, 1970. — 512с.

16. Bauer, L. Block five diagonal matrices and the fast numerical solution of the biharmonic equation / L. Bauer, E. Reiss // Math. Comput. — 1972. — V.26, 118. — P. 311–326.

References

1. Zubov, L.M. Uravneniya Karmana dlya uprugoy plastinki s dislokatsiyami i disklinatsiyami. [Karman equations for an elastic plate with dislocations and disclinations.] Doklady Akademii Nauk, 2007, vol. 412, no. 3, pp. 343–346 (in Russian).

2. Zubov, L.M., Pham Thu Huong. Sil'nyy izgib krugloy plastinki s nepreryvno raspredelennymi disklinatsiyami. [Strong bending of circular plate with continuously distributed disclinations.] Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Natural Sciences. 2010, no. 4, pp. 28–33 (in Russian).

3. Trenogin, V.A. Razvetvlenie resheniy nelineynykh uravneniy v banakhovom prostranstve. [Branching of solutions of non-linear equations in Banach space.] Russian Mathematical Surveys, 1958, vol. 13, iss. 4 (in Russian).

4. Srubshchik, L.S., Trenogin, V.A. O vypuchivanii gibkikh plastin. [On buckling of flexible plates.] Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1968, vol. 32, iss. 4, pp. 721–727 (in Russian).

5. Reissner E. On Postbuckling Behavior and imperfection sensitivity of Thin Elastic Plates on a Non-linear Elastic Foundation. Studies in Appl. Math., 1970, vol. XLIX, no. 1, pp. 45–57.

6. Srubshchik, L.S. Kraevoy effekt i vypuchivanie tonkikh plastin na nelineyno-uprugom osnovanii. [The edge effect and buckling of thin plates on nonlinear elastic foundation.] Differential Equations, 1985, vol. XXI, no. 10, pp.1790–1794 (in Russian).

7. Peshkhoev, I.M. Srubshchik, L.S Vypuchivanie i poslekriticheskoe povedenie szhatoy pryamougol'noy plastiny na nelineyno-uprugom osnovanii. [Buckling and post critical behavior of compressed rectangular plate on nonlinear elastic foundation.] Rostov-on-Don, 1983, 17 p. Dep. in VINITI 07.83, no. 4037–83 (in Russian).

8. Baul, A.V., Peshkhoev, I.M., Srubshchik, L.S Vliyanie nachal'nykh nesovershenstv na vypuchivanie prodol'no szhatykh pryamougol'nykh tsilindricheskikh paneley i plastin. [Influence of initial imperfections on the buckling of longitudinally compressed rectangular cylindrical panels and plates.] Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Natural Sciences.1986, no. 1, pp. 34–37 (in Russian).

9. Peshkhoev, I.M. Vetvlenie ravnovesiy szhatoy uprugoy pryamougol'noy plastiny s dislokatsiyami i disklinatsiyami. [Branching of equilibria of compressed elastic rectangular plate with dislocations and disclinations.] XI vserossiyskiy s''ezd po fundamental'nym problemam teoreticheskoy i prikladnoy mekhaniki, sb. dokl., Kazan', 20 – 24 avgusta 2015 g. [Proc. XI All-Russian Congress on fundamental issues of Theoretical and Applied Mechanics, Kazan, 20 -. 24 August, 2015] pp. 2989–2991 (in Russian).

10. Timoshenko, S.P., Voynovsky-Krieger, S. Plastinki i obolochki. [Plates and shells.] Moscow: Fizmatgiz, 1966, 636 p. (in Russian).

11. Vorovich, I.I. Matematicheskie problemy nelineynoy teorii pologikh obolochek. [Mathematical problems of non-linear shallow-shell theory.] Moscow: Nauka, 1989, 376 p. (in Russian).

12. Morozov, N.F. K nelineynoy teorii tonkikh plastin. [On nonlinear theory of thin plates.] Doklady AN SSSR, 1957, vol. 114, no. 5, pp. 968–671 (in Russian).

13. Weinberg, M.M., Trenogin, V.A. Teoriya vetvleniya resheniy nelineynykh uravneniy. [Theory of branching of nonlinear equation solutions] Moscow: Nauka, 1969, 528 p. (in Russian).

14. Peshkhoev, I.M. Asimptotika i vetvlenie ravnovesiy szhatykh uprugikh pryamougol'nykh plastin i sterzhney na nelineyno uprugom osnovanii: dissert. … k-ta fiz.-mat. nauk. [Asymptotics and branching of equilibria of compressed elastic rectangular plates and rods on nonlinear elastic foundation: Cand.Sci. (Phys.-Math.) diss.]. Rostov-on-Don, 1991, 146 p. (in Russian).

15. Mikhlin, S.G. Variatsionnye metody v matematicheskoy fizike. [Variational methods in mathematical physics] Moscow: Nauka, 1970, 512 p. (in Russian).

16. Bauer, L., Reiss, E. Block five diagonal matrices and the fast numerical solution of the biharmonic equation. Math. Comput., 1972, vol. 26, 118, pp. 311–326.

Поступила в редакцию 28.08.2015
Сдана в редакцию 28.08.2015
Запланирована в номер 22.01.2016

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.9:531.3 DOI 10.12737/18207

Синергетический подход при изучении устойчивости формообразующих траекторий попутного фрезерования боковыми гранями концевых фрез (случай малой скорости резания)[*]

В. Л. Заковоротный[1], А. А Губанова[2], А. Д. Лукьянов[3]**

[1, 2, 3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Synergetic approach to studying stability of form-building trajectories of climb milling by side edges of endmills (low cutting speed case)[***]

V. L. Zakovorotny[1], A. A. Gubanova[2], A. D. Lukyanov[3]**

[1, 2, 3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью работы является рассмотрение проблемы устойчивости стационарных траекторий упругих деформационных смещений инструмента при продольном фрезеровании концевыми фрезами. В подвижной системе координат, перемещение которой определяется движением исполнительных элементов, стационарным установившимся состоянием является не точка равновесия (как при точении), а некоторая замкнутая траектория. Использована синергетическая концепция анализа траекторий, выполняемого в два этапа. На первом этапе по предложенной методике вычисляются установившиеся стационарные траектории. На втором этапе анализируется их устойчивость. В предлагаемой статье исследуется случай, когда в пределах импульсной реакции системы параметры уравнений в вариациях относительно стационарной траектории можно считать постоянными. Рассмотрены особенности формирования стационарных траекторий, получены условия, при которых они сходятся к некоторым установившимся траекториям. Кроме того, получены некоторые общие свойства потери равновесия. Приводится пример анализа и даются рекомендации по обеспечению устойчивости траектории установившихся формообразующих движений.

Stability problems of the stationary trajectories of the tool elastic deformational displacement under the longitudinal endmilling are considered. In the moving coordinates which displacement is determined by the actuators motion, the stationary steady state is not an equilibrium point (as when turning), but some closed trajectory. The synergetic concept of the analysis of trajectories executed in two stages is used. At the first stage, the established stationary trajectories are calculated according to the offered technique. At the second stage, the stability of these trajectories is analyzed. A case, when the equation parameters in variations under the fixed trajectory can be considered constant within the system impulsive reaction, is considered. Features of the stationary trajectories formation are studied; conditions under which they converge to some steady trajectories are obtained. Besides, some general properties of the loss of balance are received. An example of analysis is cited, and recommendations for ensuring stability of a trajectory of the established form-building motions are given.

Ключевые слова: динамика процесса фрезерования концевыми фрезами, стационарные траектории, устойчивость, синергетика, переменные параметры.

Keywords: endmilling dynamics, stationary trajectories, stability, synergetics, variable parameters.

Введение. Одной из центральных проблем науки во второй половине XX века стало формирование синергетической парадигмы эволюции и самоорганизации [1–4]. В известных работах [5, 6] предложено использовать ее для управления сложными нелинейными объектами, в том числе для анализа и синтеза динамической системы резания [7–9]. Система резания рассматривается как взаимодействие подсистем инструмента и обрабатываемой детали через связь, формируемую процессом обработки [10–16]. Данная связь является нелинейной с периодически изменяющимися параметрами и обладает свойством эволюционной изменчивости [7–9]. В литературе описаны проблемы устойчивости и

[*]Работа выполнена по гранту РФФИ №14-08-00206а.

[**]E-mail: vzakovorotny@dstu.edu.ru, anatoliya81@mail.ru, lex1998@rambler.ru

[***]The research is done on RFFI grant no. 14-08-00206a.

многообразий, формируемых в окрестностях равновесия. Рассматриваются автоколебания [17, 18], инвариантные торы [19–21] и хаотические аттракторы [19–23]. Показано, что упругие деформационные смещения не могут быть скалярными, если необходимо раскрыть их основные динамические свойства. Они, как минимум, должны анализироваться в плоскости [24–27]. На динамические свойства системы оказывает влияние и тип процесса резания [7, 8, 26–48].

Из рассматриваемых в данном контексте процессов наиболее сложным является фрезерование [26–47]. Это обусловлено его нестационарностью, периодическими изменениями параметров длины и толщины слоя, срезаемого каждым режущим лезвием фрезы. Поэтому в подвижной системе координат, перемещение которой определяется траекториями исполнительных элементов, стационарным установившимся состоянием является не точка равновесия (как при точении), а некоторая замкнутая траектория. В связи с этим уравнение динамики в общем случае имеет периодически изменяющиеся коэффициенты. Кроме того, учитывается влияние запаздывающих аргументов [28–39]. В указанных работах для изучения устойчивости используется теория Флоке для T — периодических процессов. Изучается процесс фрезерования на станках, имеющих до пяти координат управления при обработке деталей, матрицы жесткости которых существенно изменяются вдоль траектории движения инструмента [40–47]. В настоящей статье результаты отмеченных выше работ рассматриваются в отношении полных нелинейных математических моделей с учетом периодического изменения параметров. При этом ставится задача исследования устойчивости не точки в подвижной системе координат, а стационарной траектории формообразующих движений. Здесь можно рассматривать два случая. Первый относится к обработке с малыми частотами вращения шпинделя, когда в системе в пределах импульсной реакции параметры можно считать замороженными. Это явление рассматривается в рамках данной работы. Второй случай относится к обработке с большими частотами вращения инструмента, когда параметры нельзя считать замороженными. Соответствующий материал будет рассмотрен в следующей статье.

Представленный в рамках данного исследования случай исследуется с учетом синергетического принципа декомпозиции систем уравнений. При этом рассматриваются два иерархических уровня. Первый — определение стационарной траектории формообразующих движений, которая характеризуется тем, что $X(t) = X(t-kT), k = 1,2,3...$ (здесь T — время периодического повторения вариации площади срезаемого слоя, $X(t)$ — вектор пространственных упругих деформационных смещений). Второй — анализ уравнения в вариациях относительно этих траекторий и определение их устойчивости. Возможность построения иерархии уравнений динамики опирается на синергетические принципы [5–7], а также на асимптотические свойства нелинейных дифференциальных уравнений, имеющих малые параметры при производных [49, 50].

Базовая математическая модель. Исследуем попутное фрезерование боковыми лезвиями прямозубой концевой фрезой недеформируемой заготовки (рис. 1).

Деформации инструмента рассмотрим в плоскости, нормальной к оси инструмента. Будем считать, что ширина b обрабатываемой заготовки такова, что изгибом фрезы при ее деформировании можно пренебречь. Тогда $b = const$. Толщина срезаемого слоя определяется $a(\varphi) = a_к(\varphi) - X_1(\varphi)$. Здесь $a_к(\varphi)$ — составляющая толщины, зависящая от угла φ поворота фрезы. Она не учитывает упругие деформационные смещения в направлении, нормальном к поверхности резания X_1, и является периодической функцией угла φ. Введем понятие стационарной траектории деформационных смещений $X^*(\varphi) = \{X_1^*(\varphi), X_2^*(\varphi)\}^T$. Она характеризует установившиеся упругие деформационные смещения инструмента и является периодической функцией φ с тем же периодом. Если в системе сформировалась стационарная траектория, то для нее справедливо: $a(\varphi) = a(\varphi - i\Delta\varphi)$, $a_k(\varphi) = a_k(\varphi - i\Delta\varphi)$, $X^*(\varphi) = X^*(\varphi - i\Delta\varphi), i = 0,1,2,...$ Рассматривается случай $\Omega = const$, где Ω — циклическая частота вращения фрезы. Тогда $\phi = \int_0^t \Omega dt = \Omega t$. Следовательно, справедливо: $a(t) = a(t - iT)$, $a_k(t) = a_k(t - iT)$, $X^*(t) = X^*(t - iT), i = 0,1,2...$

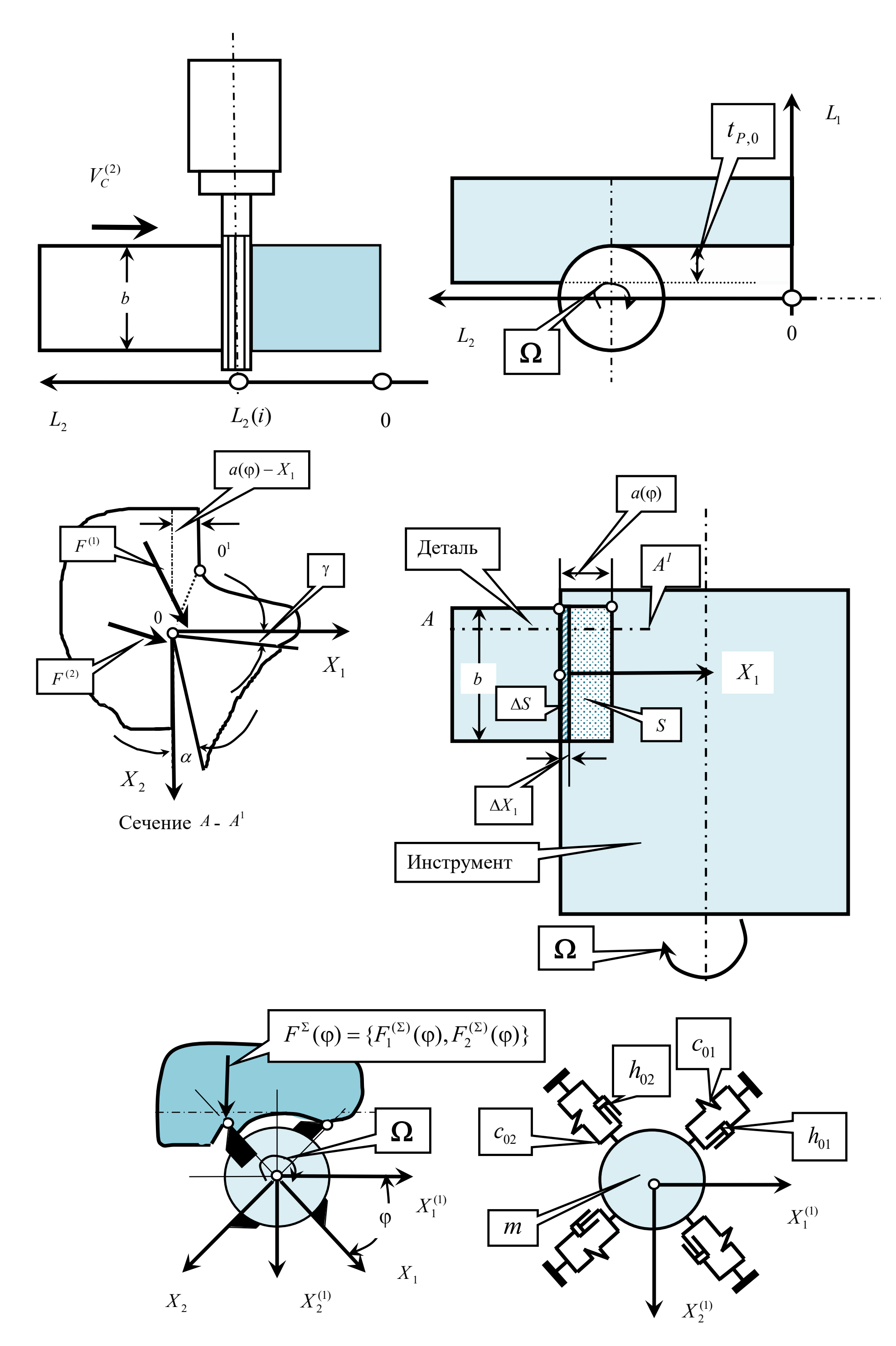


Рис. 1. Схема взаимодействия подсистем инструмента и обрабатываемой заготовки

Введем в рассмотрение две системы координат. Первая имеет начало координат в центре фрезы без учета упругих деформационных смещений. В этой системе $X^{(1)}=\{X_1^{(1)},X_2^{(1)}\}^T\subset\aleph^{(1)}$ рассматриваются деформации центра фрезы. В частности, при продольном фрезеровании система движется по направлению L_2 со скоростью $V_C^{(2)}$ (рис. 1). В общем случае траектория центра вращения фрезы без учета ее упругих деформационных смещений определяется двумя фазовыми траекториями $(V_C^{(1)}=dL_1/dt,L_1)$ и $(V_C^{(2)}=dL_2/dt,L_2)$. Фактически это программа ЧПУ станка.

Вторая система привязана к кинематической траектории движения режущего лезвия, рассматривает деформационные смещения его вершины: $X=\{X_1,X_2\}^T\subset\aleph$. Так как нет деформации режущего лезвия по отношению к телу фрезы, то деформациям вершины режущего лезвия соответствуют деформационные смещения оси фрезы. Очевидно, связь между этими системами координат определяется

$$X^{(1)} = S^{(1)} X \,, \tag{1}$$

где $S^{(1)} = \begin{bmatrix} \sin\varphi & \cos\varphi \\ -\cos\varphi & \sin\varphi \end{bmatrix}$, а также

$$X = S X^{(1)} \,, \tag{2}$$

где $S = \begin{bmatrix} \sin\varphi & -\cos\varphi \\ \cos\varphi & \sin\varphi \end{bmatrix}$.

Так как $\Omega = const$, то операторы $S(\Omega t)$ и $S^{(1)}(\Omega t)$ есть периодические функции времени. При рассмотрении системы в пространстве $\aleph$ фрезерование имеет свойства, аналогичные точению, но обработка ведется с периодически изменяющейся толщиной срезаемого слоя. Пусть в этом пространстве заданы силы, действующие на режущее лезвие. Тогда деформационные смещения в пространстве $\aleph$ определяются из системы

$$m\frac{d^2X}{dt^2} + h\frac{dX}{dt} + cX = F^{\Sigma}(t), \tag{3}$$

где $m = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & m \end{bmatrix}$, $h = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{2,1} \\ h_{1,2} & h_{2,2} \end{bmatrix}$, $c = \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{2,1} \\ c_{1,2} & c_{2,2} \end{bmatrix}$ — матрицы инерционных, диссипативных и упругих коэффициентов инструмента; $F^{\Sigma}(t) = \{F_1^{(\Sigma)}(t), F_2^{(\Sigma)}(t)\}^T$.

Параметры *m, h,* и с можно определить по правилам, изложенным, например, в [7, 8, 16, 51]. При полной симметрии инструмента матрицы h , c не только симметричные, но и диагональные [51]. Кроме того, они имеют равные коэффициенты и не изменяются при переходе от пространства $\aleph$ к $\aleph^{(1)}$.

Использование синергетического подхода требует выяснения законов взаимодействия системы со средой [3–7], в нашем случае — с процессом резания. Поэтому необходимо силы резания представить в координатах состояния. Они определяются суммой сил, действующих на переднюю $F^{(1)}$ и на заднюю $F^{(2)}$ грани инструмента, то есть $F^{\Sigma} = F^{(1)} + F^{(2)}$ (см. рис. 1).

Следуя [7, 8, 16, 20, 21], можно утверждать:
— силы возрастают при увеличении площади срезаемого слоя;
— имеет место запаздывание между изменениями площади и вариациями сил; — при увеличении скорости резания наблюдается уменьшение сил, которое в скоростном диапазоне (40–180) м/мин можно считать экспоненциальным.

Сила $F^{(2)}$ резко увеличивается при увеличении скорости движения инструмента в сторону заготовки. Зависимость данной силы от колебательной скорости характеризует нелинейное демпфирование колебаний инструмента.

Используется также гипотеза о неизменности ориентации сил в установившемся состоянии. Она определяется для силы $F^{(1)}$ угловыми коэффициентами χ_1 и χ_2 . Для силы $F^{(2)}$ — $\chi_1^{(1)}$ и $\chi_2^{(1)}$. Этим свойствам соответствуют следующие представления сил $F^{\Sigma}(t) = \{F_1^{(\Sigma)}(t), F_2^{(\Sigma)}(t)\}^T$:

$$\begin{cases} F_1^{(\Sigma)}(X_1, X_2) = \chi_1\rho_0[1 + \mu\exp(-\alpha_1(V - \dfrac{X_2}{dt}))]\cdot b\cdot[a_k(t) - Y_1] + \chi_1^{(1)}F^{(0)}\cdot\exp[-\alpha_2 dX_1/dt]; \\ F_2^{(\Sigma)}(X_1, X_2) = \chi_2\rho_0[1 + \mu\exp(-\alpha_1(V - \dfrac{X_2}{dt}))]\cdot b\cdot[a_k(t) - Y_2] + \chi_2^{(1)}F^{(0)}\cdot\exp[-\alpha_2 dX_1/dt]; \\ T_1\dfrac{dY_1}{dt} + Y_1 = X_1; \\ T_2\dfrac{dY_2}{dt} + Y_2 = X_1. \end{cases} \tag{4}$$

Здесь T_1 , T_2 — постоянные времени, моделирующие запаздывание сил по отношению к смещениям, с, причем $T_2 \rangle T_1$ (таким образом, учитывается фазовый сдвиг между вариациями сил в направлениях X_1, X_2); ρ_0 — давление стружки на переднюю грань инструмента, кг/мм^2 (в области малых скоростей давление стремится к координате $\rho_0(1+\mu)$, а в области высоких скоростей — к координате ρ_0); $F_1^{(0)}$ — сила, действующая на заднюю грань инструмента в состоянии равновесия, кг; α_1, α_2 — параметры, определяющие крутизну изменения сил, с/мм; V — скорость резания, м/мин.

Модель (3), дополненная (4), является моделью динамической системы фрезерования прямозубыми концевыми фрезами. В данном случае обработка ведется без перекрытия контактов зубьями фрезы.

Анализ установившейся стационарной траектории. Рассмотрим продольное фрезерование с постоянными технологическими режимами. Под установившейся стационарной траекторией $X^*(t)=\{X_1^*,X_2^*\}^T$ понимается удовлетворяющая требованиям траектория, полученная из (3) и (4). Во-первых, на рассматриваемом временном интервале она удовлетворяет $\frac{dX_1}{dt}=\frac{dX_2}{dt}\Rightarrow 0$. Например, при фрезеровании четырехзубой фрезой диаметром 60,0 мм со скоростью 144 м/мин частота следования контактов зубьев фрезы с заготовкой равна 13,3 Гц, что на два порядка меньше собственной частоты изгибных деформаций инструмента. В этом случае при заданном времени t параметры системы можно считать постоянными, и для всех $t\in(0,t_0)$ из (3), (4) вычисляются точки равновесия. Здесь 0 — момент начала контакта зуба с деталью, t_0 — время окончания контакта. Во-вторых, $X^*(t)=X^*(t-iT)$, то есть являются завершенными переходные процессы, связанные с перераспределением сил и деформационных смещений, влияющих на силы в пределах каждого контакта зубьев. Исходя из определения траектории $X^*(t)$, для ее вычисления необходимо воспользоваться системой

$$c_\Sigma^* X^*(t)=F^\Sigma(X^*,t)\,, \tag{5}$$

где $F_1^{(\Sigma)}(X_1^*,t)=\chi_1\rho_0[1+\mu\exp(-\alpha_1 V)]ba_k(t)+\chi_1^{(1)}F^{(0)}$; $F_2^{(\Sigma)}(X_1^*,t)=\chi_2\rho_0[1+\mu\exp(-\alpha_1 V)]ba_k(t)+\chi_2^{(1)}F^{(0)}$;

$$c_\Sigma^*=\begin{bmatrix} c+\chi_1\rho_0[1+\mu\exp(-\alpha_1 V)]\cdot b & 0 \\ \chi_1\rho_0[1+\mu\exp(-\alpha_1 V)]\cdot b & c \end{bmatrix}.$$

Решение (5) принципиально зависит от $a_k(t)$. При этом учитывается, что упругие деформационные смещения в пределах i-го контакта влияют на толщину срезаемого слоя $a(t)$ в пределах $\mathrm{i}+1$-го контакта. Таким образом, за счет перераспределения сил и деформаций в пределах каждого контакта наблюдается переходный процесс, который заканчивается, если $a(t)=a(t-iT)$. Тогда $X^*(t)=X^*(t-iT)$, что имеет место в случае, если параметры в (3), (4) можно считать замороженными [52]. Это справедливо, когда сдвиг по времени T на порядок больше времени импульсной реакции системы. В большинстве случаев это условие выполняется. Если траектория $X^*(t)=X^*(t-iT)$ определена, то на основе (1) определяется стационарная траектория деформационных смещений тела инструмента в пространстве $\aleph^{(1)}$.

Вычисления показывают, что $a(\varphi)$ с погрешностью не выше 2,0 % можно аппроксимировать треугольными характеристиками (рис. 2). Для ее вычисления необходимо знать:

— φ_0 — угол встречи инструмента с деталью;

— $\varphi^{(0)}$ — угол окончания контакта;

— $\varphi_{0,1}$ — угол, соответствующий максимальной толщине (припуск $a^{(0)}$ при $\varphi_{0,1}$ показан на рис. 2).

Эти параметры зависят от подачи на зуб $S_{p,0}$ и величины припуска на фрезерование $t_{p,0}$.

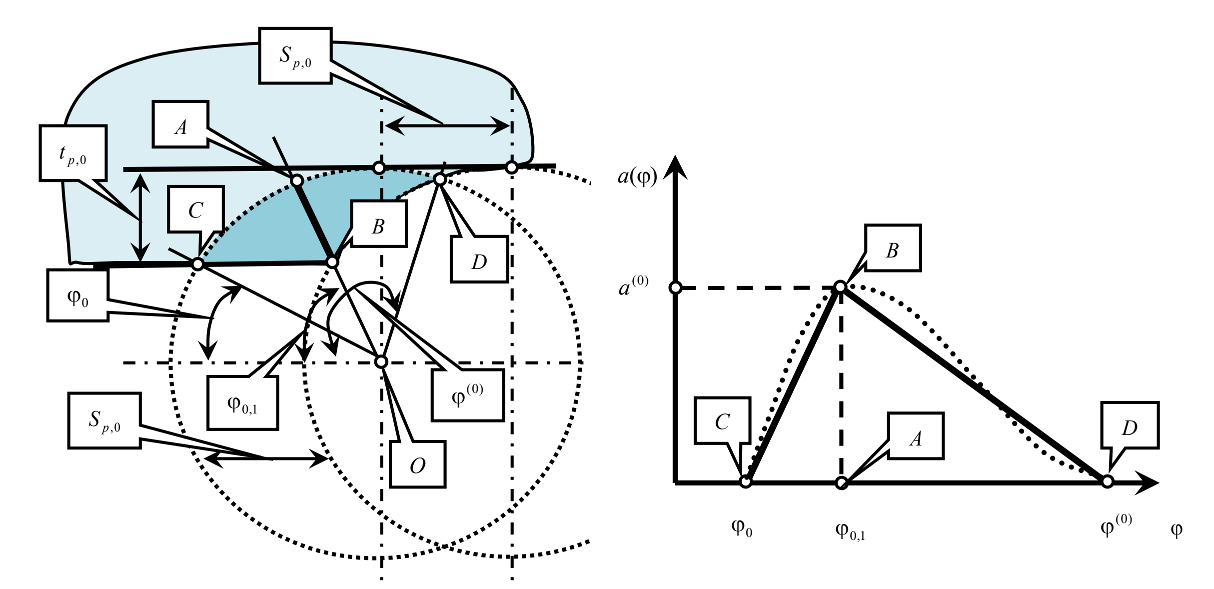


Рис. 2. Схема вычисления базовых параметров аппроксимирующей характеристики изменения толщины срезаемого слоя



Рассмотрим пример цифрового моделирования траекторий сил и деформаций (рис. 3).

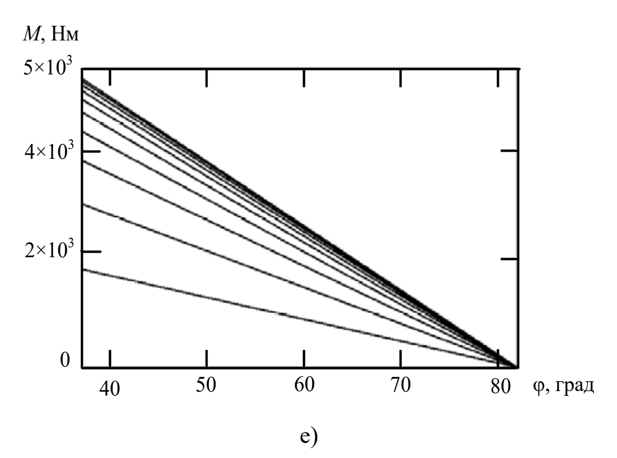
а)

б)

в)

г)

д)



е)

Рис. 3. Пример изменения величины припуска (а), деформационных смещений тела фрезы в плоскости (б), по углу поворота фрезы (в, г), сил в плоскости (д) и момента по углу при возрастании угла поворота фрезы (е)

Анализируется фрезерование четырехзубой фрезой диаметром D = 60,0 мм с припуском $t_{P,0}$ = 20 мм и подачей $S_{P,0}$ = 0,1 мм. Ширина b = 20 мм. Угловые коэффициенты: $\chi_1 = 0{,}6$, $\chi_2 = 0{,}8$. Параметры инструмента и процесса резания: с = 200 кг/мм, ρ_0 = 26 кг/мм^2. Таким образом, жесткость процесса резания равна $\rho_0 b$ = 520 кг/мм.

Анализ траекторий показывает главную особенность их выхода на режим стационарных периодических изменений: по мере установления стационарного состояния упругие деформационные смещения возрастают. Это объясняется тем, что при врезании инструмента текущие значения припуска уменьшаются за счет деформационных смещений. Однако в дальнейшем они, как правило, асимптотически стремятся к своему установившемуся стационарному состоянию, если технологические режимы постоянны и нет вариаций припуска. Время установления зависит от текущих значений жесткости инструмента и процесса резания. Показательным является анализ эволюции параметра $a^{(0)}$ на рис. 2.

Рассмотрим вопрос об установлении стационарного значения $a^{(0)}$. Пусть задано значение деформационного смещения в точке $\varphi_{0,1}$ на i-й итерации. Из (5) для фиксированной скорости $X_1(i) = a^{(0)}(i)\dfrac{\rho\chi_1}{c+\rho\chi_1}$. Здесь $\rho = \rho_0 b$.

Следовательно, $a^{(0)}(i+1) = a^{(0)}(i)(1 + \dfrac{\rho\chi_1}{c+\rho\chi_1})$, или на s-й итерации

$$a^{(0)}(s) = a^{(0)}(1)[1 + (\frac{\rho\chi_1}{c+\rho\chi_1}) + (\frac{\rho\chi_1}{c+\rho\chi_1})^2 + \cdots + (\frac{\rho\chi_1}{c+\rho\chi_1})^S] \quad (6)$$

Последовательность (6) при $S \Rightarrow \infty$ представляет ряд, который при условии $(\dfrac{\rho\chi_1}{c+\rho\chi_1})\langle 1$ сходится к выражению $(\dfrac{c+\rho\chi_1}{c})$. Таким образом,

$$a^{(0)}(s)_{при:\ S\to\infty} = a^{(0)}(1)(\frac{c+\rho\chi_1}{c}) \quad (7)$$

где $a^{(0)}(1)$ — толщина срезаемого слоя на первой итерации обработки без учета упругих деформаций.

Выражение (7) есть асимптота, к которой приближается функция толщины срезаемого слоя по мере увеличения количества итераций обработки, то есть времени. Проанализируем (6) и (7). Ряд (6) представляет геометрическую прогрессию по отношению к $q = (\dfrac{\rho\chi_1}{c+\rho\chi_1})$. Он является сходящимся при $0\langle(\dfrac{\rho\chi_1}{c+\rho\chi_1})\langle 1$. При резании это условие, как правило, выполняется, так как $c\rangle 0$, $\rho\rangle 0$. Обычно $\chi_1\rangle 0$. Коэффициент χ_1 зависит от переднего угла инструмента. При больших значениях переднего угла возможно $\chi_1\langle 0$, то есть при увеличении припуска направление деформации инструмента меняет знак. Наблюдается эффект затягивания вершины инструмента в зону резания.

Таким образом, возможны условия, при которых последовательность (6) становится расходящейся. Тогда стационарной траектории не существует. Из (6) следует: по мере увеличения жесткости c по отношению к жесткости процесса резания время установления стационарного состояния уменьшается.

Устойчивость стационарной траектории. Пусть заданы $a(t)$ и $X^*(t)=\{X_1^*,X_2^*\}^T$. Деформационным смещениям $X^*(t)=\{X_1^*,X_2^*\}^T$ из (4) соответствует траектория $Y^*(t)=\{Y_1^*,Y_2^*\}^T$. Таким образом, на предварительном этапе функции $a(t)$, $X^*(t)$ и $Y^*(t)$ являются заданными. После замены $X(t)=X^*(t)+x(t)$, $Y(t)=Y^*(t)+y\ (t)$ с учетом (3), (4) получаем линеаризованное уравнение в вариациях относительно стационарной траектории $X^*(t)$, $Y^*(t)$:

$$m\frac{d^2x}{dt^2}+h_\Sigma(t)\frac{dx}{dt}+c_\Sigma(t)x=0, \tag{8}$$

где $x(t)=\{x_1(t),x_2(t),y_1(t),y_2(t)\}^T$; $a_0(t)=a(t)-Y_1^*(t)$; $V_0(t)=V-dX_2^*(t)/dt$;

$$c_\Sigma(t)=\begin{bmatrix} c & 0 & \chi_1\rho_0[1+\mu\exp(-\alpha_1V_0(t))] & 0 \\ 0 & c & 0 & \chi_2\rho_0[1+\mu\exp(-\alpha_1V_0(t))] \\ -1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \end{bmatrix};\ m=\begin{bmatrix} m & 0 & 0 & 0 \\ 0 & m & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$h_\Sigma(t)=\begin{bmatrix} h+\chi_1^{(1)}\alpha_2F^{(0)}\exp(-\alpha_1V_0dX_1^*/dt) & -\chi_1\alpha_1\rho_0b\mu\exp(-\alpha_1V_0(t))a_0(t) & 0 & 0 \\ \chi_2^{(1)}\alpha_2F^{(0)}\exp(-\alpha_1V_0dX_1^*/dt) & h-\chi_2\alpha_1\rho_0b\mu\exp(-\alpha_1V_0(t))a_0(t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & T_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & T_2 \end{bmatrix}.$$

В (8) $a_0(t)$, dX_1^*/dt и $V_0(t)$ — заданные медленно изменяющиеся функции времени. Они состоят из постоянной и периодически изменяющейся составляющих. Система устойчива в случае, если она устойчива на отрезке $t\in(0,t_0)$. Наиболее наглядно особенности потери устойчивости можно проанализировать на основе построения областей D – разбиения в плоскости двух варьируемых параметров: T_1 и $\rho=\rho_0b$ (рис. 4).

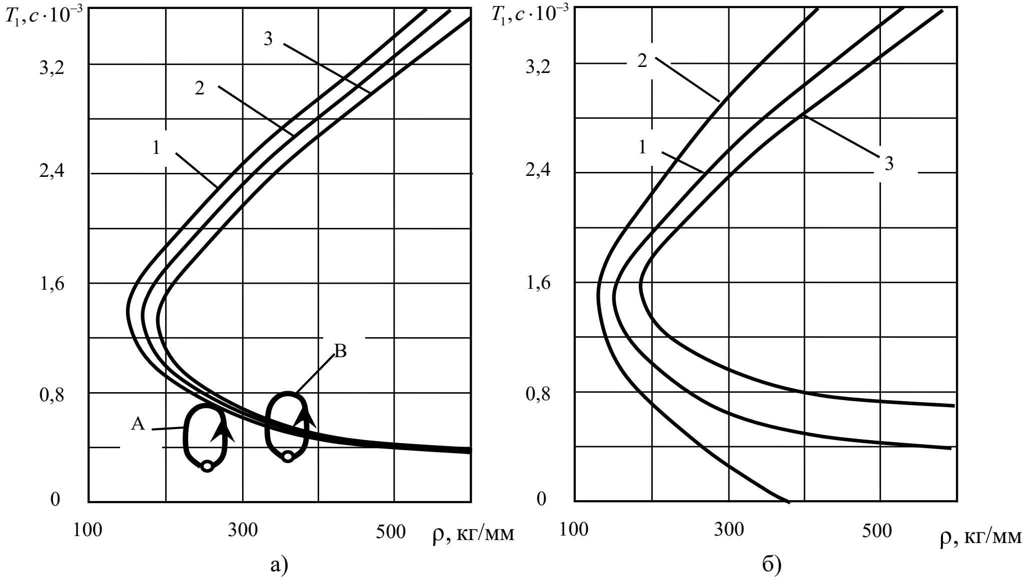


Рис. 4. Области устойчивости в плоскости T_1, ρ : при параметре $\alpha_1=0{,}5$ 1 – $T_2=T_1$, 2 – $T_2=0{,}5T_1$, 3 – $T_2=0{,}1T_1$ (а); при параметре $T_2=T_1$ $1-\alpha_1=0{,}5$, $2-\alpha_1=0{,}8$, $3-\alpha_1=0{,}2$ (б)

На иллюстрации в левой части от фигуративных линий система является асимптотически устойчивой. Проанализируем эти области. При постоянном значении ρ (например, $\rho=300$ кг/мм) существует ограниченный диапазон изменения $T_1\in(0{,}7;2{,}6)\cdot10^{-3}c$, при которых система теряет устойчивость. Параметр T_1, прежде всего, зависит от скорости резания. Поэтому потеря устойчивости наблюдается в среднескоростном диапазоне, что соответствует экспериментально наблюдаемым данным [5, 6, 13–16]. Здесь существует две тенденции. С одной стороны, увеличение T_1 вызывает возрастание фазового сдвига между смещениями и силами, что способствует потере устойчивости. С другой — при увеличении T_1 возрастает затухание в вариации сил, что способствует стабилизации равновесия. Таким образом, интенсивность возбуждения колебаний максимальна в среднескоростном диапазоне (в цитированной литературе экспериментально наблюдаемые максимальные амплитуды отмечаются при скоростях 60–80 м/с).

Анализируется обработка стали 40ХН2МА четырехзубой концевой фрезой из стали Р9К5. Диаметр фрезы $d = 80{,}0$ мм, припуск — 10,0 мм. Частота системы без динамической связи: $\omega_{0,1}^{(1)} = 1020$ Гц. Параметрами, влияющими на устойчивость, являются: ρ, α_1, T_1, T_2. Их легко идентифицировать на основе использования методов экспериментальной динамики, изложенных, например, в работах [8, 9, 33]. Параметры приведены в таблице 1.

Таблица 1

Идентифицированные параметры модели

m, кг·с²/мм	h, кг·с/мм	с, кг/мм	α_2, с/мм	μ	$F^{(0)}$, кг
$3{,}0\cdot10^{-3}$	5,0	3000	65	0,5	2,0

В диапазоне скоростей (0,7–3,0) м/с зависимость давления стружки от скорости определяется $\rho_0 = 30{,}0(1+0{,}5e^{-0{,}5V})$. Параметр $\alpha_1 \in (1{,}0;0{,}2)$. Заметим, что ρ можно варьировать в широком диапазоне, например изменяя b. Параметры α_2 и μ считаются фиксированными. Параметр T_2 рассматривается связанным с T_1, то есть $T_2 = kT_1, k \in (0{,}1)$.

Обсуждение результатов. Анализ устойчивости показал, что, когда скорость вращения инструмента на порядок меньше импульсной реакции системы, система фрезерования обладает следующими общими свойствами.

1. Подсистема инструмента представляет собой один колебательный контур при любых направлениях сил. За счет реакции со стороны резания она теряет эти свойства. Здесь уже можно выделить два колебательных контура, которые взаимно влияют друг на друга и на устойчивость траекторий.

2. Матрицы $h_\Sigma(t)$ и $c_\Sigma(t)$ являются несимметричными. Они представимы в виде суммы симметричной и кососимметричной составляющих. Таким образом, за счет реакции со стороны резания в системе формируются диссипативные или ускоряющие силы (определяются симметричной частью $h_\Sigma(t)$), гироскопические силы (определяются кососимметричной частью $h_\Sigma(t)$), потенциальные (определяются симметричной составляющей $c_\Sigma(t)$) и циркуляционные силы (определяются кососимметричной составляющей матрицы $c_\Sigma(t)$). Вначале рассмотрим составляющие матрицы $h_\Sigma(t)$

$$h_\Sigma(t) = h_\Sigma^{(c)}(t) + h_\Sigma^{(k)}(t), \tag{9}$$

где

$$h_\Sigma^{(c)}(t) = \begin{bmatrix} \begin{matrix} h + \chi_1^{(1)}\alpha_2 F^{(0)}\exp(\alpha_2 V_{X_2}) - \\ -\chi_1\rho_0 b T_1[1+\mu\exp(-\alpha_1 V_{X_1})]; \end{matrix} & \begin{matrix} 0{,}5\{\chi_2^{(1)}\alpha_2 F^{(0)}\exp(\alpha_2 V_{X_2}) - \\ -\chi_2 T_2\rho_0 b[1+\mu\exp(-\alpha_1 V_{X_1}(t)] - \\ -\chi_1\alpha_1\rho_0 b\mu a_0(t)\exp[-\alpha_1 V_{X_1}(t)]\}; \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0{,}5\{\chi_2^{(1)}\alpha_2 F^{(0)}\exp(\alpha_2 V_{X_2}) - \\ -\chi_2 T_2\rho_0 b[1+\mu\exp(-\alpha_1 V_{X_1}(t)] - \\ -\chi_1\alpha_1\rho_0 b\mu a_0(t)\exp[-\alpha_1 V_{X_1}(t)]\}; \end{matrix} & h - \chi_2\alpha_1\rho_0 b\mu a_0(t)\exp(-\alpha_1 V_{X_1}(t)) \end{bmatrix};$$

$$h_\Sigma^{(k)}(t) = \begin{bmatrix} 0 & \begin{matrix} -0{,}5\{\chi_2^{(1)}\alpha_2 F^{(0)}\exp(\alpha_2 V_{X_2}) - \\ -\chi_2 T_2\rho_0 b[1+\mu\exp(-\alpha_1 V_{X_1}(t)] + \\ +\chi_1\alpha_1\rho_0 b\mu a_0(t)\exp[-\alpha_1 V_{X_1}(t)]\} \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0{,}5\{\chi_2^{(1)}\alpha_2 F^{(0)}\exp(\alpha_2 V_{X_2}) - \\ -\chi_2 T_2\rho_0 b[1+\mu\exp(-\alpha_1 V_{X_1}(t)] + \\ +\chi_1\alpha_1\rho_0 b\mu a_0(t)\exp[-\alpha_1 V_{X_1}(t)]\} \end{matrix} & 0 \end{bmatrix}.$$

Из [53] известно, что необходимым условием устойчивости равновесия является положительная определенность матрицы $h_\Sigma^{(c)}(t)$. Если она становится отрицательно определенной, то гироскопические силы не могут стабилизировать равновесие. Отрицательную определенность матрицы $h_\Sigma^{(c)}(t)$ обусловливают, прежде всего, члены $\chi_1\rho_0 b T_1[1+\mu\exp(-\alpha_1 V_{X_1})]$ и $\chi_2\alpha_1\rho_0 b\mu a_0(t)\exp(-\alpha_1 V_{X_1}(t))$. Они зависят от площади $ba_0(t)$, скорости $V_{X_1}(t)$ с учетом скорости упругих деформационных смещений стационарной траектории, ориентации силы резания и жесткости процесса обработки. Если $T_1 = \alpha_1 = 0$, то $h_\Sigma^{(c)}(t)$ является положительно определенной. Таким образом, с принципиальных позиций уменьшение сил при увеличении скорости и их запаздывание вызывают один и тот же эффект. Не трудно показать, что такой же эффект вызывает наличие гистерезиса в зависимости сил от деформационных смещений.

Указанное необходимое условие устойчивости не является достаточным, но позволяет выяснить общие механизмы потери устойчивости.

3. Матрица $c_{\Sigma}(t)$ также представима в виде суммы

$$c_{\Sigma}(t) = c_{\Sigma}^{(c)}(t) + c_{\Sigma}^{(k)}(t), \tag{10}$$

где
$$c_{\Sigma}^{(c)}(t) = \begin{bmatrix} c + \chi_1 \rho_0 b[1 + \mu \exp(-\alpha_1 V_{X_1})]; & 0{,}5\chi_2 \rho_0 b[1 + \mu \exp(-\alpha_1 V_{X_1})]; \\ 0{,}5\chi_2 \rho_0 b[1 + \mu \exp(-\alpha_1 V_{X_1})]; & c \end{bmatrix};$$

$$c_{\Sigma}^{(k)}(t) = \begin{bmatrix} 0 & -0{,}5\chi_2 \rho_0 b[1 + \mu \exp(-\alpha_1 V_{X_1})]; \\ 0{,}5\chi_2 \rho_0 b[1 + \mu \exp(-\alpha_1 V_{X_1})]; & 0 \end{bmatrix}.$$

Мы видим, что кососимметричная составляющая матрицы (10) принципиально зависит от углового коэффициента χ_2. Если $\chi_2 = 0$, то циркуляционные силы не образуются. Следовательно, геометрия инструмента должна влиять на динамические свойства. Заметим, что при условии $\chi_2 \rangle\rangle \chi_1$ не только формируются циркуляционные силы, но и $c_{\Sigma}^{(c)}(t)$ может стать отрицательно определенной. В этом случае система также теряет устойчивость, причем потеря устойчивости существует в форме прецессионных колебаний с возрастающей амплитудой.

4. При движении каждого зуба фрезы вдоль обрабатываемой поверхности изменяются параметры системы. Поэтому вдоль траектории движения наблюдается перестройка свойств системы. Она проходит медленно, в пределах импульсной реакции системы. Однако по мере увеличения скорости начинают сказываться параметрические явления, которые будут рассмотрены в следующей статье. При движении инструмента вдоль обрабатываемой поверхности изменяется скорость резания за счет скоростей упругих деформационных смещений. Изменяется и толщина срезаемого слоя. В пределах каждого цикла T_0 стационарных периодических движений очевидным условием является $\int_{t}^{t+T_0} V(t)\, dt \equiv 0$. Поэтому средняя скорость остается неизменной. Она в конечном счете задается постоянной частотой вращения шпинделя. Однако за счет упругих деформационных смещений скорость становится переменной. На этапе возрастания a (участок *C*—*B* на рис. 2) скорость резания уменьшается, а на участке уменьшения припуска (*B*—*D*) — возрастает. При этом изменяется толщина срезаемого слоя. Наименее благоприятным для устойчивости является участок нарастания толщины срезаемого слоя. Здесь, во-первых, возрастает градиент изменения сил по отношению к вариациям скорости. Во-вторых, за счет увеличения толщины срезаемого слоя изменяются все параметры, способствующие потере устойчивости.

На рис. 4, а – условно показаны два цикла вариаций параметров. Цикл *A* соответствует условиям, при которых траектория является устойчивой в целом. Цикл *B* соответствует неустойчивой траектории в некотором диапазоне изменения параметров. Если существуют временные отрезки, на которых система теряет устойчивость, то в окрестности траектории образуются некоторые притягивающие множества. В этом случае в системе формируется сложная динамика, анализ которой будет выполнен в следующей статье этой серии.

5. При движении вдоль установившейся стационарной траектории происходит перестройка динамической системы, что отображается в образовании периодических траекторий корней характеристического полинома авторегрессионной модели сигнала виброакустической эмиссии процесса. Если воспользоваться ранее полученными результатами, относящимися к процессу точения [54], то по траекториям корней можно оценивать состояние инструмента и самого процесса.

Выводы. При точении стационарным состоянием является точка упругих деформаций вершины режущего инструмента относительно детали, расположенная в подвижной системе координат, движение которой определяется траекториями исполнительных элементов станка. В отличие от точения, при фрезеровании эта точка вырождается в замкнутую траекторию деформационных смещений инструмента относительно обрабатываемой заготовки. Эта замкнутая траектория определяется на основе перераспределения сил и упругих деформационных смещений по пути обработки.

Если при контакте зуба фрезы и обрабатываемой детали данная траектория устойчива, то она характеризует аттрактор, то есть притягивающее множество в пространстве состояния. Приведенные материалы по анализу устойчивости этих траекторий позволяют на стадии проектирования выбирать технологические режимы и параметры инструмента, при которых стационарная траектория является асимптотически устойчивой. Кроме того, проведенное исследование открывает новое направление динамической диагностики состояния процесса фрезерования на основе измерения вибрационных последовательностей, сопровождающих обработку.

Библиографический список

1. Пригожин, И. Порядок из хаоса / И. Пригожин, И. Стенгерс ; под общ. ред. В. И. Аршинова, Ю. Л. Климонтовича, Ю. В. Сачкова. — Москва : Прогресс, 1986. — 193 с.

2. Пригожин, И. Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой / И. Пригожин, И. Стенгерс. — Москва : Едиториал УРСС, 2003. — 312 с.

3. Хакен, Г. Синергетика. Иерархия неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах / Г. Хакен. — Москва : Мир, 1985. — 424 с.

4. Хакен, Г. Тайны природы. Синергетика: учение о взаимодействии / Г. Хакен. — Москва ; Ижевск : Институт компьютерных исследований, 2003. — 320 с.

5. Колесников, А. А. Синергетическая теория управления / А. А. Колесников. — Москва : Энергоатомиздат, 1994. — 344 с.

6. Синергетика и проблемы теории управления / под ред. А. А. Колесникова. — Москва : Физматлит, 2004. — 504 с.

7. Заковоротный, В. Л. Динамика процесса резания. Синергетический подход / В. Л. Заковоротный, М. Б. Флек . — Ростов-на-Дону : Терра, 2006. — 880 с.

8. Синергетический системный синтез управляемой динамики металлорежущих станков с учетом эволюции связей / В. Л. Заковоротный [и др.]. — Ростов-на-Дону : Изд-во ДГТУ, 2008. — 324 с.

9. Zakovorotny, V. L. The Problems of Control of the Evolution of the Dynamic System Interacting with the Medium / V. L. Zakovorotny, A. D. Lukyanov // International Journal of Mechanical Engineering and Automation. — 2014. — Vol. 1, № 5. — P. 271–285.

10. Тлустый, И. Автоколебания в металлорежущих станках / И. Тлустый. — Москва : Машгиз, 1956. —395 с.

11. Selbsterregte Schwingungen an Werkzeugmaschinen / I. Tlusty. — Berlin : Veb Verlag Technik Berlin, 1962. — 320 p.

12. Tobias, S.-A. Machine Tool Vibrations / S.-A. Tobias. — London : Blackie, 1965. — 350 p.

13. Кудинов, В. А. Динамика станков / В. А. Кудинов. — Москва : Машиностроение, 1967. — 359 с.

14. Эльясберг, М. Е. Автоколебания металлорежущих станков: теория и практика / М. Е. Эльясберг. — Санкт-Петербург : ОКБС, 1993. — 182 с.

15. Вейц, В. Л. Задачи динамики, моделирования и обеспечения качества при механической обработке маложестких заготовок / В. Л. Вейц, Д. В. Васильков // СТИН. — 1999. —№ 6.— С. 9–13.

16. Заковоротный, В. Л. Математическое моделирование и параметрическая идентификация динамических свойств подсистемы инструмента и заготовки / В. Л. Заковоротный, Д.-Т. Фам, С.-Т. Нгуен // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. — 2011. — № 2. — С. 38–46. — (Технические науки).

17. Соколовский, А. П. Вибрации при работе на металлорежущих станках / А. П. Соколовский // Исследование колебаний при резании металлов. — Москва : Машгиз, 1958. — С. 15–18.

18. Мурашкин, Л. С. Прикладная нелинейная механика станков / Л. С. Мурашкин, С. Л. Мурашкин. — Ленинград : Машиностроение, 1977. — 192 с.

19. Zakovorotny, V. L. Bifurcations in the dynamic system of the mechanic processing in metal-cutting tools / V. L. Zakovorotny // Journal of Transactions on Applied and Theoretical Mechanics. — 2015. —Vol. 10. — P. 102–116.

20. Заковоротный, В. Л. Самоорганизация и бифуркации динамической системы обработки металлов резанием / В. Л. Заковоротный, Д.-Т. Фам, В. С. Быкадор // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. — 2014. — Т. 22, № 3. — С. 26–40.

21. Заковоротный, В. Л. Влияние изгибных деформаций инструмента на самоорганизацию и бифуркации динамической системы резания металлов / В. Л. Заковоротный, Д.-Т. Фам, В. С. Быкадор // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. — 2014. — Т. 22, № 3. — С. 40–53.

22. Stepan, G. Delay-differential equation models for machine tool chatter / G. Stepan ; ed. F. C. Moon . — New York : John Wiley, 1998. — P. 165–192.

23. Stepan, G. Delay, Parametric excitation, and the nonlinear dynamics of cutting processes / G. Stepan, T. Insperge, R. Szalai // International Journal of Bifurcation and Chaos, 2005. — Vol. 15, № 9. — P. 2783–2798.

24. Tobias, S.-A. Theory of regenerative machine tool chatter / S. A. Tobias, W. Fishwick // The Engineer. — 1958. — Vol. 205. — P. 199–203.

25. Merritt, H.-E. Theory of self-excited machine tool chatter / H.-E. Merritt // ASME. Journal of Engineering for Industry. — 1965. — Vol. 205, № 11. — P. 447–454.

26. Sridhar, R. A stability algorithm for the general milling process. Contribution to machine tool chatter research — 7 / R. Sridhar, R.-E. Hohn, G.-W. Long // ASME. Journal of Engineering for Industry. — 1968. — Vol. 90, № 2. — P. 330–334.

27. Altintas, Y. Analytical prediction of stability lobes in milling / Y. Altintas, E. Budak // CIRP Annals. — 1995. — Vol. 44, № 1. — P. 357–362.

28. Tlusty, J. Special aspects of chatter in milling / J. Tlusty, F. Ismail // ASME. Journal of Vibration, Stress and Reliability in Design. — 1983. — Vol. 105, № 1. — P. 24–32.

29. Minis, I. A new theoretical approach for the prediction of machine tool chatter in milling / I. Minis, T. Yanushevsky // ASME. Journal of Engineering for Industry. — 1993. — Vol. 115, № 2. — P. 1–8.

30. Insperger, T. Stability of the milling process / T. Insperger, G. Stepan // Periodical Polytechnic-Mechanical Engineering. — 2000. — Vol. 44, № 1. — P. 47–57.

31. Budak, E. Analytical prediction of chatter stability in milling. Part I: General formulation / E. Budak, Y. Altintas // ASME. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. — 1998. — Vol. 120, № 6 (1). — P. 22–30.

32. Budak, E. Analytical prediction of chatter stability conditions for multi-degree of systems in milling. Part II: Applications / E. Budak, Y. Altintas // ASME. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control. — 1998. — Vol. 120, № 6 (1). — P. 31–36.

33. Merdol, D. Multi-frequency solution of chatter stability for low immersion milling / D. Merdol, Y. Altintas // ASME. Journal of Manufacturing Science and Engineering. — 2004. — Vol. 126, № 3. — P. 459–466.

34. Stability of up-milling and down-milling. Part 1: Alternative analytical methods / T. Insperger // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2003. — Vol. 43, № 1. — P. 25–34.

35. Kline, W.-A. The prediction of surface accuracy in end milling / W.-A. Kline, R.-E. Devor, I.-A. Shareef // ASME. Journal of Engineering for Industry. — 1982. — Vol. 104, № 5. — P. 272–278.

36. Elbestawi, M.-A. Dynamic modeling for the prediction of surface errors in milling of thin-walled sections / M.-A. Elbestawi, R. Sagherian // Theoretical and Computational Fluid Dynamics. — 1991. — Vol. 25, № 2. — P. 215–228.

37. Campomanes, M.-L. An improved time domain simulation for dynamic milling at small radial immersions / M.-L. Campomanes, Y. Altintas // ASME. Journal of Manufacturing Science and Engineering. — 2003. — Vol. 125, № 3. — P. 416–425.

38. Paris, H. Surface shape prediction in high-speed milling / H. Paris, G. Peigne, R. Mayer // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2004. — Vol. 44, № 15. — P. 1567–1576.

39. Altintas, Y. A general mechanics and dynamics model for helical end mills / Y. Altintas, P. Lee // CIRP Annals. — 1996. — Vol. 45, № 1. — P. 59–64.

40. Ozturk, E. Modeling of 5-axis milling processes / E. Ozturk, E. Budak // Machining Science and Technology. — 2007. — Vol. 11, № 3. — P. 287–311.

41. Budak, E. Modeling and simulation of 5-axis milling processes / E. Budak, E. Ozturk, L.-T. Tunc // CIRP Annals. Manufacturing Technology. — 2009. — Vol. 58, № 1. — P. 347–350.

42. Stability limits of milling considering the flexibility of the workpiece and the machine / U. Bravo [et al.] // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2005. — Vol. 45. — P. 1669–1680.

43. Modeling regenerative workpiece vibrations in five-axis milling / K. Weinert [et al.] // Production Engineering. Research and Development. — 2008. — № 2. — P. 255–260.

44. Biermann, D. A general approach to simulating workpiece vibrations during five-axis milling of turbine blades / D. Biermann, P. Kersting, T. Surmann // CIRP Annals. Manufacturing Technology. — 2010. — Vol. 59, № 1. — P. 125–128.

45. Воронов, С. А. Методика применения численного моделирования динамики многокоординатного фрезерования сложнопрофильных деталей при проектировании технологического процесса / С. А. Воронов, И. А. Киселев, С. В. Аршинов // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Машиностроение. — 2012. — Спецвыпуск, № 6. — С. 50–69.

46. Воронов, С. А. Критерии оценки устойчивости процесса фрезерования нежестких деталей / С. А. Воронов, А. В. Непочатов, И. А. Киселев // Известия вузов. Машиностроение. — 2011. — № 1 (610). — С. 50–62.

47. Voronov, S. Dynamics of flexible detail milling / S. Voronov, I. Kiselev // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics. — 2011. — Vol. 225, № 3. — P. 1177–1186.

48. Заковоротный, В. Л. Свойства формообразующих движений при сверлении глубоких отверстий малого диаметра / В. Л. Заковоротный, Е. Ю. Панов, П. Н. Потапенко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2001. — Т. 1, № 2. — С. 81–93.

49. Понтрягин, Л. С. Избранные труды. Т. 2 / Л. С. Понтрягин. — Москва : Наука, 1988. —576 с.

50. Тихонов, А. Н. Дифференциальные уравнения, содержащие малый параметр / А. Н. Тихонов, А. Б. Васильев, В. М. Волосов // Труды международного симпозиума по нелинейным колебаниям. — Киев : Изд-во АН УССР, 1963. — С. 56–61.

51. Заковоротный, В. Л. Моделирование деформационных смещений инструмента относительно заготовки при точении / В. Л. Заковоротный, Д.-Т. Фам, С.-Т. Нгуен // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2010. — Т. 7 (50). — С. 1005–1015.

52.Данжело, Р. Линейные системы с переменными параметрами / Р. Данжело. — Москва : Машиностроение, 1974. — 287 с.

53.Березкин, Е. Н. Лекции по теоретической механике / Е. Н. Березкин. — Москва : Изд-во МГУ, 1968. — 279 с.

54.Заковоротный, В. Л. Построение информационной модели динамической системы металлорежущего станка для диагностики процесса обработки / В. Л. Заковоротный, И. В. Ладник // Проблемы машиностроения и надежности машин. — 1991. — № 4. — С.75–81.

References

1. Prigozhin, I., Stengers, I.; Arshinov, V.I., Klimontovich, Y.L., Sachkov, Y.V., eds. Poryadok iz khaosa. [Order out of chaos.] Moscow: Progress, 1986, 193 p. (in Russian).
2. Prigozhin, I., Stengers, I. Poryadok iz khaosa. Novyy dialog cheloveka s prirodoy [Order out of chaos. A new dialogue of man with nature.] Moscow: Editorial URSS, 2003, 312 p. (in Russian).
3. Haken, G. Sinergetika. Ierarkhiya neustoychivostey v samoorganizuyushchikhsya sistemakh i ustroystvakh. [Synergetics. Hierarchy of instabilities in self-organizing systems and devices.] Moscow: Mir, 1985, 424 p. (in Russian).
4. Haken, G. Tayny prirody. Sinergetika: uchenie o vzaimodeystvii. [Secrets of nature. Synergetics: theory of interaction.] Moscow; Izhevsk: Institute of Computer Science, 2003, 320 p. (in Russian).
5. Kolesnikov, A.A. Sinergeticheskaya teoriya upravleniya. [Synergetic control theory.] Moscow: Energoatomizdat, 1994, 344 p. (in Russian).
6. Kolesnikov, A.A. ed. Sinergetika i problemy teorii upravleniya. [Synergetics and control theory problems.] Moscow: Fizmatlit, 2004, 504 p. (in Russian).
7. Zakovorotny, V.L., Flek, M.F. Dinamika protsessa rezaniya. Sinergeticheskiy podkhod. [Cutting process dynamics. Synergetic approach.] Rostov-on-Don: Terra, 2006, 880 p. (in Russian).
8. Zakovorotny, V.L., et al. Sinergeticheskiy sistemnyy sintez upravlyaemoy dinamiki metallorezhushchikh stankov s uchetom evolyutsii svyazey. [Synergetic system synthesis of controlled dynamics of machine tools with coupling evolution.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2008, 324 p. (in Russian).
9. Zakovorotny, V.L., Lukyanov, A.D. The Problems of Control of the Evolution of the Dynamic System Interacting with the Medium. International Journal of Mechanical Engineering and Automation, 2014, vol. 1, no. 5, pp. 271–285.
10. Tlusty, I. Avtokolebaniya v metallorezhushchikh stankakh. [Self-oscillations in machine tools.] Moscow: Mashgiz, 1956, 395 p. (in Russian).
11. Tlusty, I. Selbsterregte Schwingungen an Werkzeugmaschinen. Berlin: Veb Verlag Technik Berlin, 1962, 320 p.
12. Tobias, S.-A. Machine Tool Vibrations. London: Blackie, 1965, 350 p.
13. Kudinov, V.A. Dinamika stankov. [Machine dynamics.] Moscow: Mashinostroenie, 1967, 359 p. (in Russian).
14. Elyasberg, M.E. Avtokolebaniya metallorezhushchikh stankov: teoriya i praktika. [Self-oscillations of machine tools: theory and practice.] St. Petersburg: OKBS, 1993, 182 p. (in Russian).
15. Veits, V.L., Vasilkov, D.V. Zadachi dinamiki, modelirovaniya i obespecheniya kachestva pri mekhanicheskoy obrabotke malozhestkikh zagotovok. [Problems of dynamics, simulation and quality assurance under machining of nonrigid workpieces.] STIN, 1999, no. 6, pp. 9–13 (in Russian).
16. Zakovorotny, V.L., Pham Dinh Tung, Nguen Xuan Chiem. Matematicheskoe modelirovanie i parametricheskaya identifikatsiya dinamicheskikh svoystv podsistemy instrumenta i zagotovki. [Mathematical modeling and parametric identification of dynamic properties of the subsystem of the cutting tool and workpiece in the turning.] University News. North-Caucasian region. Technical Sciences Series, 2011, no. 2, pp. 38–46 (in Russian).
17. Sokolovskiy, A.P. Vibratsii pri rabote na metallorezhushchikh stankakh. Issledovanie kolebaniy pri rezanii metallov. [Vibration at work on machine tools. Study on vibrations in metal cutting] Moscow: Mashgiz, 1958, pp. 15–18 (in Russian).
18. Murashkin, L.S., Murashkin, S.L. Prikladnaya nelineynaya mekhanika stankov. [Applied nonlinear machine engineering.] Leningrad: Mashinostroenie, 1977, 192 p. (in Russian).
19. Zakovorotny, V.L. Bifurcations in the dynamic system of the mechanic processing in metal-cutting tools. Journal of Transactions on Applied and Theoretical Mechanics, 2015, vol. 10, pp. 102–116.
20. Zakovorotny, V.L., Pham D.-T., Bykador, V.S. Samoorganizatsiya i bifurkatsii dinamicheskoy sistemy obrabotki metallov rezaniem. [Self-organization and bifurcations of dynamical metal cutting system.] Izvestia VUZ. Applied Nonlinear Dynamics, 2014, vol. 22, no. 3, pp. 26–40 (in Russian).
21. Zakovorotny, V.L., Pham D.-T., Bykador, V.S. Vliyanie izgibnykh deformatsiy instrumenta na samoorganizatsiyu i bifurkatsii dinamicheskoy sistemy rezaniya metallov. [Influence of a flexural deformation of a tool on self-organization and bifurcations of dynamical metal cutting system.] Izvestia VUZ. Applied Nonlinear Dynamics, 2014, vol. 22, no. 3, pp. 40–53 (in Russian).

22. Stepan, G.; Moon F.C., ed. Delay-differential equation models for machine tool chatter. New York: John Wiley, 1998, pp. 165–192.

23. Stepan, G., Insperge, T., Szalai, R. Delay, parametric excitation, and the nonlinear dynamics of cutting processes. International Journal of Bifurcation and Chaos, 2005, vol. 15, no. 9, pp. 2783–2798.

24. Tobias, S.-A., Fishwick, W. Theory of regenerative machine tool chatter. The Engineer, 1958, vol. 205, pp. 199–203.

25. Merritt, H.-E. Theory of self-excited machine tool chatter. ASME. Journal of Engineering for Industry, 1965, vol. 205, no. 11, pp. 447–454.

26. Sridhar, R., Hohn, R.-E., Long, G.-W. A stability algorithm for the general milling process. Contribution to machine tool chatter research - 7. ASME. Journal of Engineering for Industry, 1968, vol. 90, no. 2, pp. 330–334.

27. Altintas, Y., Budak, E. Analytical prediction of stability lobes in milling. CIRP Annals, 1995, vol. 44, no. 1, pp. 357–362.

28. Tlusty, J., Ismail, F. Special aspects of chatter in milling. ASME. Journal of Vibration, Stress and Reliability in Design, 1983, vol. 105, no. 1, pp. 24–32.

29. Minis, I., Yanushevsky, T. A new theoretical approach for the prediction of machine tool chatter in milling. ASME. Journal of Engineering for Industry, 1993, vol. 115, no. 2, pp. 1–8.

30. Insperger, T., Stepan, G. Stability of the milling process. Periodical Polytechnic-Mechanical Engineering, 2000, vol. 44, no. 1, pp. 47–57.

31. Budak, E., Altintas, Y. Analytical prediction of chatter stability in milling. Part I: General formulation. ASME. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1998, vol. 120, no. 6 (1), pp. 22–30.

32. Budak, E., Altintas, Y. Analytical prediction of chatter stability conditions for multi-degree of systems in milling. Part II: Applications. ASME. Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, 1998, vol. 120, no. 6 (1), pp. 31–36.

33. Merdol, D., Altintas, Y. Multi-frequency solution of chatter stability for low immersion milling. ASME. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2004, vol. 126, no. , pp. 459–466.

34. Insperger, T. Stability of up-milling and down-milling. Part 1: Alternative analytical methods. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2003, vol. 43, no. 1, pp. 25–34.

35. Kline, W.-A., Devor, R.-E, Shareef, I.-A. The prediction of surface accuracy in end milling. ASME. Journal of Engineering for Industry, 1982, vol. 104, no. 5, pp. 272–278.

36. Elbestawi, M.-A., Sagherian, R. Dynamic modeling for the prediction of surface errors in milling of thin-walled sections. Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 1991, vol. 25, no. 2, pp. 215–228.

37. Campomanes, M.-L., Altintas, Y. An improved time domain simulation for dynamic milling at small radial immersions. ASME. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2003, vol. 125, no. 3, pp. 416–425.

38. Paris, H., Peigne, G., Mayer, R. Surface shape prediction in high-speed milling. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2004, vol. 44, no. 15, pp. 1567–1576.

39. Altintas, Y., Lee, P. A general mechanics and dynamics model for helical end mills. CIRP Annals, 1996, vol. 45, no. 1, pp. 59–64.

40. Ozturk, E., Budak, E. Modeling of 5-axis milling processes. Machining Science and Technology, 2007, vol. 11, no. 3, pp. 287–311.

41. Budak, E., Ozturk, E., Tunc, L.-T. Modeling and simulation of 5-axis milling processes. CIRP Annals. Manufacturing Technology, 2009, vol. 58, no. 1, pp. 347–350.

42.Bravo, U., et al. Stability limits of milling considering the flexibility of the workpiece and the machine. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2005, vol. 45, pp. 1669–1680.

43.Weinert, K., et al. Modeling regenerative workpiece vibrations in five-axis milling. Production Engineering. Research and Development, 2008, no. 2, pp. 255–260.

44.Biermann, D., Kersting, P., Surmann, T. A general approach to simulating workpiece vibrations during five-axis milling of turbine blades. CIRP Annals. Manufacturing Technology, 201, vol. 59, no. 1, pp. 125–128.

45.Voronov, S.A., Kiselev, I.A., Arshinov, S.V. Metodika primeneniya chislennogo modelirovaniya dinamiki mnogokoordinatnogo frezerovaniya slozhnoprofil'nykh detaley pri proektirovanii tekhnologicheskogo protsessa. [Application methods of numerical simulation of multi-axis milling dynamics of figurine-shaped detection under process designing.] Vestnik MGTU im. N. E. Baumana, Machine Building, 2012, spec. iss. no. 6, pp. 50–69 (in Russian).

46.Voronov, S.A., Nepochatov, A.V., Kiselev, I.A. Kriterii otsenki ustoychivosti protsessa frezerovaniya nezhestkikh detaley. [Estimation criteria of process stability of non-stiff workpieces milling.] Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building, 2011, no. 1 (610) pp. 50–62 (in Russian).

47.Voronov, S., Kiselev, I. Dynamics of flexible detail milling. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics, 2011, vol. 225, no. 3, pp. 1177–1186.

48.Zakovorotny, V.L., Panov, E.Y., Potapenko, P.N. Svoystva formoobrazuyushchikh dvizheniy pri sverlenii glubokikh otverstiy malogo diametra. [Properties of forming movements when drilling deep pinholes.] Vestnik of DSTU, 2001, vol. 1, no. 2, pp. 81–93 (in Russian).

49.Pontryagin, L.S. Izbrannye trudy. T. 2 [Selecta. Vol. 2.] Moscow: Nauka, 1988, 576 p. (in Russian).

50.Tikhonov, A.N., Vasilyev, A.B., Volosov, V.M. Differentsial'nye uravneniya, soderzhashchie malyy parametr. [Differential equations with a small parameter.] Trudy mezhdunarodnogo simpoziuma po nelineynym kolebaniyam. [Proc. Int. Symposium on nonlinear oscillations.] Kiev: Izd-vo AN USSR, 1963, pp. 56–61 (in Russian).

51.Zakovorotny, V.L., Pham Dinh Tung, Nguen Xuan Chiem. Modelirovanie deformatsionnykh smeshcheniy instrumenta otnositel'no zagotovki pri tochenii. [Modeling of tool deformation offsetting to workpiece in turning.] Vestnik of DSTU, 2010, vol. 7 (50), pp. 1005–1015 (in Russian).

52.Danzhelo, R. Lineynye sistemy s peremennymi parametrami. [Linear systems with variable parameters.] Moscow: Mashinostroenie, 1974, 287 p. (in Russian).

53.Berezkin, E.N. Lektsii po teoreticheskoy mekhanike. [Lectures on theoretical mechanics.] Moscow: Izd-vo MGU, 1968, 279 p. (in Russian).

54.Zakovorotny, V.L., Ladnik, I.V. Postroenie informatsionnoy modeli dinamicheskoy sistemy metallorezhushchego stanka dlya diagnostiki protsessa obrabotki. [Building of data model of the machine tool dynamic system for treatment process diagnostics.] Journal of Machinery Manufacture and reliability, 1991, no. 4, pp. 75–81 (in Russian).

Поступила в редакцию 16.09.2015
Сдана в редакцию 17.09.2015
Запланирована в номер 22.01.2016



УДК 620.193.1:621.165.51 DOI 10.12737/18260

Исследования в области каплеударной эрозии энергетического оборудования: ретроспективный обзор и анализ текущего состояния [*]

В. Н. Варавка [1], О. В. Кудряков[1], И. С. Морозкин[2], И. Ю. Забияка[1] [**]

[1] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

[2] Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Research in domain of droplet impingement erosion of the power equipment: lookback study and context analysis [***]

V. N. Varavka[1], O. V. Kudryakov[1], I. S. Morozkin[2], I. Yu. Zabiyaka[1][**]

[1] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

[2] Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Основная цель работы — формирование научной базы для корректного определения комплекса требований к конструкционному материалу с высокой стойкостью к износу в условиях каплеударной эрозии. Выполнен обзор современного и ретроспективного состояния отечественных и зарубежных исследований в области каплеударной эрозии металлических материалов. В качестве основных итогов отмечены недостаточная фундаментальность исследований в этой области, ограниченность используемых теоретических моделей, односторонний избирательный подход многих авторов к явлению, объединяющему целый комплекс факторов различной физической природы. На этом фоне представлена авторская концепция процесса эрозионного изнашивания металла в условиях воздействия двухфазного паро-капельного потока, наблюдаемого, например, в лопаточном аппарате последних ступеней мощных паровых турбин, а также при работе газотурбинного и компрессорного оборудования. Особое внимание уделено новой научной гипотезе о влиянии активного водорода на разрушение металла при высокоскоростных капельных соударениях.

Ключевые слова: каплеударная эрозия, усталостное разрушение, кавитация, водородное изнашивание, лопатки паровых турбин, металлические сплавы, антиэрозионная защита.

The main work objective is the creation of the scientific background for correct determination of a set of requirements to the fabrication material with a high-wearing feature under the droplet impingement erosion. A review of a backward and present state of the art of the national and foreign investigations in the field of the droplet impingement erosion of metal materials is carried out. The main outcome is as follows: insufficient fundamentality of research in this area; limitation of the used theoretical models; one-sided approach of many authors to the phenomenon that combines a whole set of factors of different physical nature. On this background, the author's concept of the erosive wear process of metal under the influence of two-phase mist flow is presented. Particular attention is paid to a new scientific hypothesis of the active hydrogen effect on the fracture of metal under the hypervelocity dropwise collisions.

Keywords: droplet impingement erosion, fatigue failure, cavitation, hydrogen wear, steam turbine blades, metal alloys, anti-erosive protection.

Введение: материаловедческая проблематика в области повышения работоспособности теплоэнергетического оборудования. Тепловой метод генерации энергии в настоящее время занимает доминирующее положение среди существующих способов производства электроэнергии, покрывая около 70% общего мирового объема потребления. Большинство экспертных оценок сходится к тому, что, по крайней мере до середины текущего столетия ситуация вряд ли существенно изменится [1]. Устойчивости такого положения в глобальной энергетике способствует ряд факторов. Большая часть из них хорошо известна [2]. Например, доступность и достаточность сырьевой базы тепловой энергетики; её технологическая и эксплуатационная надежность; постоянно прогрессирующий рост КПД тепло-

[*] Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 15-08-06181).

[**]E-mail: varavkavn@gmail.com, kudryakov@mail.ru, mis_tm@mail.ru, zabiyakaigor@gmail.com

[***] The research is done with the financial support from RFFI (grant no. 15-08-06181).

энергетических установок, достигший в настоящее время для ПГУ уровня 55–60% (полвека назад он составлял чуть выше 30%). Однако есть факторы, не менее значительные, но «не лежащие на поверхности». К ним следует отнести две взаимосвязанных проблемы: глубина исследованности физических процессов, происходящих при работе энергетического оборудования, и обеспеченность энергетики надежными конструкционными материалами. Тесная взаимозависимость этих сфер очевидна — оптимальность материаловедческого решения определяется полнотой комплекса требований к материалам для изготовления оборудования и конструкций. Этот тезис может быть проиллюстрирован на примере лопаточного аппарата паровых турбин.

Общеизвестно, что идеальный КПД тепловой машины η описывается выражением: $\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}$, где T_1 и T_2 — абсолютные температуры рабочего газа и внешней среды. То есть рост КПД паровой турбины обеспечивается повышением температуры рабочего пара T_1. Реальный КПД турбины зависит не только от T_1 и T_2 и на практике значительно меньше идеального. Тем не менее, повышение температуры пара увеличивает эффективность турбины, поэтому в турбостроении в настоящее время происходит переход к массовому использованию пара с супер-сверхкритическими параметрами (35 МПа, 650 °С) взамен сверхкритического пара (24 МПа, 565 °С). За рубежом ведутся разработки [1] энергоблоков с начальной температурой пара 720°С. Следствием этого процесса является ужесточение условий работы материала узлов турбины, в частности, лопаточного аппарата. Комплекс требований включает высокую прочность, термостойкость, коррозионную стойкость (сопротивление высокотемпературному окислению), сопротивление тепловой усталости, стойкость к ползучести, минимизация по удельному весу. Такой перечень существенно ограничивает выбор материалов. Так, применение супер-сверхкритического пара закрывает дорогу к использованию большинства жаропрочных сталей перлитного и феррито-мартенситного структурных классов из-за их недостаточной термостойкости [2]. А пар с температурой 720°С уже требует перехода к многокомпонентным суперсплавам на основе никеля (система Ni-Co-W-Cr-Al-Ti-Mo) не столько из-за термостойкости, сколько по параметру стойкости к ползучести. Стойкость к ползучести таких сплавов обеспечивается наличием большого количества растворенных атомов (Co-W-Cr) и термостойких интерметаллидов (например, Ni_3Al, Ni_3Ti), реализующих твердорастворный и дисперсионный механизмы торможения дислокаций, что препятствует развитию дислокационной ползучести и диффузионной ползучести в поле напряжений (по механизму зернограничного порообразования). Коррозионная стойкость к высокотемпературному окислению приобретается за счет формирования на поверхности оксидной пленки Cr_2O_3. Термический ресурс таких сплавов составляет 1000°С, а прочность и сопротивление тепловой усталости могут быть дополнительно повышены технологическими методами. Например, при изготовлении лопаток методом литья — формированием волокнистой текстуры сплава при направленном твердении. Аналогичные принципы организации состава и структуры заложены в основе турбинных суперсплавов на основе кобальта.

Суть приведенного примера суперсплавов для лопаточного аппарата современных и перспективных паровых турбин заключается в том, что корректно определенный комплекс требований к свойствам материала, как правило, может быть реализован путем материаловедческого решения (иногда — с технологическими дополнениями).

Современная мощная паровая турбина — весьма сложный технический агрегат, состоящий из нескольких последовательных ступеней лопаточного аппарата. Тепловая динамика пара, проходящего по ступеням, приводит к существенному изменению его параметров. Сформулированный выше комплекс требований к материалу лопастей турбины касается начальных параметров пара, на заключительных же ступенях условия совершенно иные: термодинамические факторы (температура и давление) меняются настолько, что приводят к фазовому переходу — появлению капельного конденсата. Остывающий паровой поток становится двухфазным, при этом радикально меняется комплекс требований к свойствам материала лопаток. Эта проблема, заключающаяся в отсутствии универсальных подходов в решении материаловедческих задач лопаточного аппарата различных ступеней турбины, привлекает к себе меньше внимания, чем разработка конструкционных материалов для начальных ступеней с жесткими термическими условиями. Однако она тоже требует своего решения, поскольку повышение продолжительности жизненного цикла рабочего тела турбины (пара) путем увеличения числа её ступеней существенно влияет на эффективность работы и на реальный КПД турбины.

Прежде чем формулировать комплекс требований к материалу лопаток последних ступеней мощных паровых турбин, остановимся на обзоре современного состояния вопроса о главной особенности работы таких лопаток — капельных соударениях конденсата с металлической поверхностью и их следствия в виде каплеударной эрозии металла.

Ретроспективный аналитический обзор исследований в области каплеударной эрозии. Активное исследование процесса капельных соударений с металлической поверхностью началось только в конце 1960-х годов в Англии (Кембридж) и США (Лос-Аламос). Это было обусловлено двумя обстоятельствами: появлением оборудования для высокоскоростной видеосъемки и потребностью аэрокосмической отрасли в изучении процессов, происходящих в атмосфере (в двухфазной газокапельной среде) при прохождении через неё летательных аппаратов. Проблемой также интересовались метеорологи, турбиностроители, производители компрессорного оборудования. Востребованность

результатов в промышленности вызвала всплеск активности в научной среде и поток публикаций на эту тему. Первые международные конференции проводились в США и Великобритании в 1970-х годах (см., например, [3]). Явление изучалось в США (лаборатория ядерных и космических исследований в Лос-Аламосе, университеты Беркли, Колумбуса, Огайо, Кентукки, Делавера, Сан-Диего, Чикаго, Цинциннати с участием компаний Белл, Вестингауз, Дженерал Электрик, Аэроспейс), в Англии (Кавендишская лаборатория Кембриджа, университеты Манчестера, Саутгемптона, Суонси), в Швеции (университет Лулео), Франции (ONERA, Шатильон), Германии (университет в Геттингене, Dornier GmbH), Израиля (университет Хайфы), Чехословакии (Шкода, Пльзень), Японии (университет в Хиросиме, компании Мицубиси и Мазда). Обобщение накопившегося экспериментального и теоретического материала было оформлено в монографии Дж. Спринжера [4] и в фундаментальных сборниках статей под редакцией К. Прис и С. ван дер Зваага [5, 6]. В исследованиях этого периода благодаря высокоскоростной видеосъемке удалось практически полностью описать гидродинамические явления, происходящие в капле жидкости при соударении с твердой плоской поверхностью. Однако, недостаток на тот момент компьютерной базы и программного обеспечения, сложность дорогостоящих экспериментальных исследований, громоздкость и недостаточная разрешающая способность электронных микроскопов оставили нерешенными две главных проблемы: динамика капельных соударений на сложном рельефе поверхности мишени и физические процессы деградации поверхности материала при каплеударном воздействии.

Недостаточность исследовательской базы привела к появлению упрощенных, односторонних подходов в изучении этих проблем. Таким недостатком, например, страдали работы под руководством Ю. В. Полежаева, в которых развивается чисто кинетический подход к процессу определения энергии эрозионного разрушения материала преграды, без учета усталостных процессов в металле, особенностей разрушения материалов с различным уровнем механических свойств, кавитационных эффектов и влияния активного водорода. В результате был предложен расчетный аппарат полуэмпирического характера с коэффициентами, имеющими большой разброс значений и неясный физический смысл [7–9].

Отсутствие фундаментальности присуще многим современным работам, посвященным проблеме каплеударной эрозии. Так, в работах известного специалиста в области эрозии А. В. Лагерева и его сотрудников исследуются и определяются интегральные характеристики эрозионного износа различных материалов без наполнения их физическим смыслом [10, 11].

Работы под руководством М. А. Скотниковой (Санкт-Петербург) отличаются глубоким материаловедческим анализом и прекрасной металлографией каплеударных эрозионных разрушений, однако совершенно не касаются физических механизмов их формирования, оперируя только к конечному результату по принципу «post factum» [12, 13].

Особо следует отметить работы научной школы Московского энергетического института под руководством В. А. Рыженкова и Л. И. Селезнева (к которой следует отнести и известного чешского специалиста Б. Станишу), обладающей современной исследовательской базой по изучению каплеударной эрозии. Эти работы посвящены изучению кинетики эрозионного процесса и применению различных антиэрозионных материалов и покрытий. Они отличаются обилием экспериментальных, хорошо систематизированных данных. Однако теоретические подходы этой школы также не избежали ограниченности. Для изучения кинетики процесса деградации материала логично использовать энергетическую модель. Однако, зная сложность явления, энергетический подход следует, на наш взгляд, дифференцировать на составляющие. Этого в работах научной школы МЭИ не сделано, что снижает значимость теоретической модели в целом и ограничивает область её применения [14]. В работах же прикладного характера этой школы, на наш взгляд, не хватает материаловедческой составляющей — процессы эрозионной деградации поверхности материала практически не рассматриваются, а только констатируется результат испытания или эксперимента [15–20].

Из зарубежных работ последнего времени стоит отметить исследования под руководством Мин-Ку Ли (Южная Корея), посвященные напряженному состоянию и механизмам разрушения металлических материалов различной структуры при жидкокапельных соударениях. Они не претендуют на всесторонний охват сложной физической картины соударений, но достаточно полно освещают распределение напряжений в таких материалах, как хромистая сталь (12% Cr), стеллит (6B) и TiN, с учетом эффекта гидродинамической кавитации в капле при соударении. Работы отличаются высоким уровнем материаловедческого сопровождения исследований, однако обходят молчанием усталостную составляющую процесса [21, 22]. В целом же зарубежные публикации по этой теме посвящены какой-либо одной стороне процесса жидкокапельных соударений с металлической поверхностью, например, компьютерному моделированию деградации капли при ударе с анализом явления гидродинамической кавитации [23, 24], стойкости лопаточных материалов и покрытий в условиях капельной эрозии [25–27], моделированию напряжений в турбинных лопатках, изготовленных из различных материалов [28], моделированию величины давления в зоне контакта на основе энергетической модели [29, 30], сравнительной интенсивности эрозионных разрушений [31], механизмам трещинообразования в конкретных сплавах [32], сравнительным характеристикам оборудования для испытаний материалов на каплеударную эрозию [33, 34]. Характеризуя зарубежные исследования, хотелось бы выделить два обстоятельства. Во-первых, во многих зарубежных исследованиях не делается различий между эрозией металла в водном потоке (под

струей воды) и дискретным капельным потоком. Считается, что оба вида эрозии имеют единую природу. Это связано со сложностью экспериментальных установок, создающих дискретный поток с каплями регулируемого размера. Таких установок в мире очень немного, поэтому, не имея к ним доступа, некоторые исследователи идут по пути меньшего сопротивления, объединяя оба вида эрозии. В свой обзор мы не включали работы, касающиеся эрозии в сплошном или спрейерном водном потоке, поскольку её физический механизм отличен от капельной эрозии. Так, например, из обзора работ, посвященных жидкостной эрозии, выполненных в Японии в период 2008–2012 гг. [35] к каплеударной эрозии может быть причислена только одна [36], в которой исследуется аспект гидродинамической кавитации. Второе обстоятельство касается присутствия водорода в эродированных образцах, прошедших стендовые эрозионные испытания, и обнаруженного авторами экспериментально. Идея участия водорода в эрозионном процессе в зарубежных публикациях не встречается. Она является новой и подлежит серьезной экспериментальной проверке, поскольку может существенно изменить привычные представления о механизмах и кинетике эрозионных разрушений.

Обращает на себя внимание также следующий факт. После бурной публикационной активности 70–80-х годов прошлого века в последние десятилетия объем статей, посвященных каплеударной эрозии существенно сократился. Причем, по доступным публикациям нельзя сказать, что проблема полностью решена. Ни фундаментального изучения проблемы, ни исчерпывающих прикладных решений по различным её аспектам к настоящему моменту не имеется. При этом известно, что крупные компании по производству мощных паровых турбин Сименс, Вестингауз, Мицубиси, СААБ и другие имеют в своем распоряжении высококлассные лаборатории и испытательные стенды для исследования каплеударных воздействий. Ведь для производителей турбин эта проблема должна быть весьма актуальна, когда на последних ступенях турбины пар начинает остывать и конденсироваться, износ лопаточного аппарата турбины резко возрастает. Тем не менее, результаты исследований из лабораторий этих компаний в широкую научную печать не проникают. В такой ситуации Россия, как один из крупнейших производителей и потребителей энергии, большая часть которой вырабатывается именно паровыми турбинами и парогазовыми установками, находится в подчиненном положении и нуждается в самостоятельном решении проблемы повышения стойкости лопаточного аппарата мощных паровых турбин. Решение проблемы жидкокапельной эрозии металлических материалов актуально также для повышения эффективности газотурбостроения и производства компрессоров.

Таким образом, по результатам выполненного обзора напрашивается главный вывод о недостаточной фундаментальности исследований в области изучения деградации (эрозии) металлической поверхности при динамическом контакте с дискретным двухфазным потоком. Работы, посвященные этой теме, в большинстве своем касаются изучения лишь какой-либо одной стороны проблемы, что влечет за собой ограниченность теоретических подходов, не учитывающих сложность явления. Этот системный недостаток сдерживает процесс разработки методов антиэрозионной защиты и специалисты этой сферы вынуждены действовать «вслепую», подбирая различные эрозионностойкие материалы и покрытия, исходя из слишком общих соображений прочности, полагаясь только на дорогостоящие стендовые или длительные натурные испытания [17–20].

Современная концепция физических процессов при каплеударной эрозии и особенности поведения конструкционных материалов. В свете представленных выше результатов обзора и анализа состояния исследований в области каплеударной эрозии, в наших собственных исследованиях последних лет [37–43] ставилась задача формирования более полной картины изучаемого явления, чем дают представленные в обзоре источники. Полученные нами результаты показывают, что износ металлической поверхности при каплеударной эрозии развивается под действием, как минимум, трех физически различных факторов: усталостных процессов, различных видов кавитации, насыщения водородом. При этом наблюдается ряд явлений, неожиданных для таких конструкционных материалов, как, например, лопаточная сталь. Под действием циклических нагрузок капельных соударений в относительно пластичных сталях (например, аустенитные стали типа Х18Н10 или сталь 20Х13 в сорбитном структурном состоянии) по механизму перколяции развивается усталостная пористость, приводящая к формированию эрозионных кратеров. Высокий уровень напряжений в поверхностном слое металла на этой стадии обусловлен схлопыванием кавитационной полости в капле в ходе процесса гидродинамической кавитации при соударении. На последующих стадиях износа в кратерах эрозионного рельефа развивается пузырьковая кавитация, значительно интенсифицирующая износ за счет формирования эрозионных свищевых каналов. Каналы формируются на стенках эрозионных кратеров и, за счет кумулятивного эффекта при схлопывании кавитационных пузырьков внутри канала, «продавливают» канал до его выхода на поверхность стали.

На участии активного водорода в эрозионном процессе следует остановиться отдельно, поскольку это — новое направление исследований. Идея о влиянии водорода возникла после экспериментального обнаружения пузырьковых треков, которые наблюдались при опускании стальных образцов в глицерин немедленно после испытаний на эрозионном стенде. Состав выделяющихся из образцов газов не идентифицировался, но их возможный набор весьма ограничен, так как связан с диссоциацией молекул воды.

Вода является активным компонентом во многих областях техники и технологии, поэтому к настоящему времени энергетические состояния воды достаточно хорошо изучены [44–46]. Например, по данным работы [44] из вось-

ми возможных элементарных каналов диссоциации молекул воды образование атомов водорода при кавитации с наибольшей вероятностью осуществляется по реакции $H_2O \rightarrow H + OH^+ + e$. Для этого уровень энергетических затрат должен составлять 18,7 эВ (1804,55 кДж/моль). Предварительные расчеты показывают, что при гидроударе давление схлопывания тороидальной кавитационной полости в водяной капле при её контакте с металлической поверхностью обеспечивает уровень энергетической активации в зоне соударения, достаточный для диссоциации молекул воды (≈1800 кДж/моль), уже при скорости соударения ≈150 м/с [41]. Это расчетное значение практически совпадает с нижним пределом скоростей соударения, при которых в сталях начинает развиваться эрозионный износ.

Идея участия активного водорода в процессе каплеударной эрозии высказывалась в работах авторов (см., например, [43]) и на данный момент существует в виде научной гипотезы, требующей более глубокой проверки. В случае подтверждения её достоверности проблема выбора материала для лопаток последних ступеней мощных паровых турбин приобретает совершенно новый ракурс. Дело в том, что водород обладает максимально высокой диффузионной способностью в стали. Он не вступает в соединения с её основными и легирующими компонентами. Его диффузия значительно ускоряется в поле напряжений. Атомарный и ионизированный водород по дислокационным трубкам и границам зерен легко проникает в зоны концентрации напряжений и в микропустоты металла (например, заполняя усталостную пористость, о которой говорилось выше). Попадая в поры в атомарном или ионизированном состоянии, водород молизуется и в таком виде покинуть поры не может. Обладая высоким парциальным давлением, водород стремится расширить полость, создавая высокое напряжение. Кроме того, при соударениях происходит периодическое деформирование поверхностного слоя и объем пор изменяется. При уменьшении объема давление водорода ещё больше возрастает. Цикличность нагружения вызывает эффект накопления напряжений, нарастающий до тех пор, пока внутреннее давление в порах не вызовет разрушения стали.

Хорошо известно, что водород является причиной специфических видов разрушения стали — водородного охрупчивания и водородного изнашивания [47]. Борьба с ними представляет серьезную проблему современного материаловедения в области трения и износа. Среди признаков, определяющих водородное охрупчивание, имеются такие как: наличие растягивающих напряжений, закрепление дислокаций, растворение водорода в решетке, наличие единой (магистральной) трещины при разрушении [47–49]. При каплеударном воздействии ни один из приведенных признаков не проявляется, поэтому исследуемый процесс, вероятнее всего, относится к водородному изнашиванию. Его основным признаком является катастрофическое разрушение той области поверхностного слоя металла, где создаются условия для высокой концентрации водорода. Именно такой характер носит процесс зарождения эрозионных кратеров в местах образования усталостной пористости.

Заключение: перспективы исследований в области защиты от каплеударной эрозии. Итак, сложность материаловедческого решения проблемы каплеударной эрозии лопаточного аппарата последних ступеней мощных паровых турбин обусловлена не только многофакторностью процесса, но ещё и тем, что на каждой стадии эрозии доминирующая роль принадлежит разным участникам процесса. В начальной фазе инкубационного периода пластическая деформация и формирование деформационного рельефа происходят при циклическом механическом воздействии, усиленном влиянием гидродинамической кавитации. В заключительной его фазе начало износа, связанное с образованием первых одиночных кратеров разрушения, вызвано, по всей вероятности, механизмом водородного изнашивания. На стадии развитого эрозионного рельефа ведущую роль в эскалации износа играет пузырьковая кавитация при участии активного водорода и усталостных процессов. Синергетическое взаимодействие всех этих факторов существенно усложняет поиск универсального способа защиты поверхности металла от агрессивного воздействия дискретного водно-капельного потока. Полагаем, что акцент прикладных исследований по разработке методов антиэрозионной защиты должен быть направлен, прежде всего, на предотвращение образования усталостной пористости и развития в этих зонах металла водородного изнашивания. Это позволит сохранить целостность поверхности изделия, то есть продлить начальную стадию эрозии (инкубационный период), и не допустить (или существенно отдалить) проявление наиболее агрессивной составляющей процесса — пузырьковой кавитации, которая возникает в уже сформировавшемся эрозионном рельефе на более поздней стадии износа.

Библиографический список

1. Сравнительный анализ эффективности теплоэнергетики России и стран мира / В. Н. Артемов [и др.] // Вестник Моск. энерг. ин-та. — 2013. — № 1. — С. 9–15.

2. Клименко, А. В. Обеспечение теплоэнергетики конструкционными материалами — основа ее надежного функционирования и развития / А. В. Клименко, Е. А. Гринь // Теплоэнергетика. — 2014. — № 1. — С. 44–49.

3. Proceedings of 5th International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact. — Cambridge, U.K. : Cavendish Laboratory, 1979. — 86 p.

4. Спринжер, Дж. С. Эрозия при воздействии капель жидкости / Дж. С. Спринжер. — Москва : Машиностроение, 1981. — 200 с.

5. Эрозия / А. Эванс [и др.]; под ред. К. Прис. — Москва : Мир, 1982. — 464 с.

6. Van der Zwaag, S., Dear, J.P., Townsend, D., and Walley, S.M. Rain and solid particle erosion damage mechanisms and materials evaluations. – Cambridge, U.K.: Cavendish Laboratory, 1986. AFWAL-TR-86-4.

7. Полежаев, Ю. В. Тепловая защита / Ю. В. Полежаев, Ф. Б. Юревич. — Москва : Энергия, 1976. — 392 с.

8. Полежаев, Ю. В. Процесс установления эрозионного разрушения материала преграды при многократном соударении частицами / Ю. В. Полежаев // Инженерно-физический журнал. — 1979. — Т. 37, № 3. — С. 389–394.

9. Расчетная модель процесса эрозионного разрушения композиционного материала / Ю. В. Полежаев [и др.] // Инженерно-физический журнал. — 1979. — Т. 37, № 3. — С. 395–404.

10. Лагерев, А. В. Вероятностное прогнозирование эрозии в системах технической диагностики влажнопаровых турбомашин / А. В. Лагерев // Изв. РАН. Энергетика. — 1997. — № 2. — С. 134–143.

11. Дергачев, К. В. Электронная система прогнозирования эрозии рабочих лопаток турбин атомных станций / К. В. Дергачев // Изв. вузов. Ядерная энергетика. — 2001. — № 3. — С. 3–13.

12. Использование титановых сплавов в качестве материала лопаток паровых турбин / М. А. Скотникова [и др.] // Вопросы материаловедения. — 2007. — № 3(51). — С. 61–70.

13. Ланина, А. А. Исследование высокоскоростного каплеударного воздействия на поверхность лопаток паровых турбин / А. А. Ланина // Инструмент и технологии. — 2008. — № 28–29. — С. 84–87.

14. Селезнев, Л. И. Оценка длительности инкубационного периода эрозионного износа конструкционных материалов / Л. И. Селезнев, В. А. Рыженков // Теплоэнергетика. — 2005. — № 4. — С. 61–63.

15. Поваров, О. А. Исследование эрозионного износа рабочих лопаток паровых турбин / О. А. Поваров, Б. Станиша, В. А. Рыженков // Теплоэнергетика. — 1988. — № 4. — С. 66–69.

16. Оценка эрозионного износа лопаточного аппарата влажнопаровых турбин АЭС / В. А. Иванов, И. П. Фаддеев, В. М. Боровков, В. И. Королев // Сб. научн. тр. Моск. энерг. ин-та. — Москва : Изд-во МЭИ, 1999. — С. 214.

17. Селезнев, Л. И. Эрозионный износ конструкционных материалов / Л. И. Селезнев, В. А. Рыженков // Технология металлов. — 2007. — № 3. — С. 19–24.

18. Селезнев, Л. И. Феноменология эрозионного износа материала конструкционных сталей и сплавов жидкими частицами / Л. И. Селезнев, В. А. Рыженков, А. Ф. Медников // Теплоэнергетика. — 2010. — № 9. — С. 12–16.

19. Рыженков, В. А. Современное состояние и способы решения проблемы эрозионного износа лопаток влажно-паровых ступеней турбин / В. А. Рыженков, А. И. Лебедева, Ал. Ф. Медников // Теплоэнергетика. — 2011. — № 9. — С. 8–13.

20. Исследование процесса изменения характеристик рельефа поверхности лопаточной стали в инкубационном периоде развития каплеударной эрозии / А. Ф. Медников, В. А. Рыженков, Л. И. Селезнев, А. И. Лебедева // Теплоэнергетика. — 2012. — № 5. — С. 69–75.

21. Min Ku Lee, Whung Whoe Kim, Chang Kyu Rhee, and Won Jong Lee. Investigation of liquid impact erosion for 12Cr steel and Stellite 6B // Journal of Nuclear Materials. — 1998. — Vol. 257. — pp. 134–144.

22. Min-Ku Lee, Whung-Whoe Kim, Chang-Kyu Rhee, and Won-Jong Lee. An analysis of stress waves in 12Cr steel, Stellite 6B and TiN by liquid impact loading // Nuclear Engineering and Design. — 2002. — Vol. 214. — pp. 183–193.

23. Haller, K.K., Ventikos, Y., Poulikakos, D., and Monkewitz, P. Computational study of High-speed liquid droplet impact // Journal of Applied Physics. — 2002. — Vol. 92, no. 5. — pp. 2821–2828.

24. Imano, A.M., and Beroual, A. Deformation of water droplets on solid surface in electric field // Journal of Colloid and Interface Science. — 2006. — Vol. 298. — pp. 869–879.

25. Mann, B.S., and Vivek, Arya. HVOF coating and surface treatment for enhancing droplet erosion resistance of steam turbine blades // Wear. — 2003. — Vol. 254. — pp. 652–667.

26. Mann, B.S., Vivek, Arya, and Pankaj, Joshi. Advanced High-Velocity Oxygen-Fuel Coating and Candidate Materials for Protecting LP Steam Turbine Blades Against Droplet Erosion // Journal of Materials Engineering and Performance. — 2005. — Vol. 14(4). — pp. 487–494.

27. Sandeep, Soni. Analysis of liquid droplet erosion for steam turbine blades of composite material // Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res. — 2012. — Vol. 1, no. 3. — pp. 214–226.

28. Zhou, Q., Li, N., Chen, X., Yonezu, A., Xu, T., Hui, Sh., and Zhang, D. Water Drop Erosion on Turbine Blades: Numerical Framework and Applications // Materials Transactions. — 2008. — Vol. 49, no.7. — pp. 1606−1615.

29. Zhou, Q., Li, N., Chen, X., Xu, T., Hui, S., and Zhang, D. Analysis of water drop erosion on turbine blades based on a nonlinear liquid-solid impact model // International Journal of Impact Engineering. — 2009. — Vol.36. — pp. 1156–1171.

30. Nicolici, S., Prisecaru, I., and Ghitescu, P. Study of fluid-structure interaction in liquid droplet impingement phenomena // U.P.B. Sci. Bull., Series D. — 2012. — Vol. 74, iss.1. — pp. 148–154.

31. Keil, T., Pelz, P.F., Kadavelil, J., Necker, J., Moser, W., and Christ, D. Droplet Impact vs. Cavitation Erosion // Proceedings of WIMRC 3rd International Cavitation Forum, 4th-6th July 2011. — UK: University of Warwick, 2011.

32. Kamkar, N., Bridier, F., Bocher, P., and Jedrzejowski, P. Water droplet erosion mechanism in rolled Ti–6Al–4V // Wear of Materials. — 2013. — Vol.301, iss.1–2. — pp. 442–448.

33. Tobin, E.F., Young, T.M., Raps, D., and Rohr, O. Comparison of liquid impingement results from whirling arm and water-jet rain erosion test facilities // Wear. — 2011. — Vol.271. — pp. 2625–2631.

34. Tobin, E.F., Young, T.M., and Raps, D. Evaluation and correlation of inter-laboratory results from a rain erosion test campaign // Proceedings of 28th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2012.

35. Fujisawa, N., Morita, R., Nakamura, A., and Yamagata, T. Critical Consideration on Wall Thinning Rate by Liquid Droplet Impingement Erosion // Journal of Advanced Maintenance. — 2012. — Vol. 4, no. 2. — pp. 79–87.

36. Hattori, S., and Takinami, M. Comparison of cavitation erosion rate with liquid impingement erosion rate // Wear. – 2010. – Vol.269. – pp. 310–316.

37. Кудряков, О. В. Механизмы формирования эрозионного износа металлических материалов при высокоскоростных капельных соударениях: Часть 1 / О. В. Кудряков, В. Н. Варавка // Материаловедение. — 2012. — № 5. — С. 36–43.

38. Кудряков, О. В. Механизмы формирования эрозионного износа металлических материалов при высокоскоростных капельных соударениях: Часть 2 / О. В. Кудряков, В. Н. Варавка // Материаловедение. — 2012. — № 6. — С. 14–19.

39. Варавка, В. Н. Особенности разрушения металлических сплавов в условиях устойчивой каплеударной эрозии / В. Н. Варавка, О. В. Кудряков // Известия вузов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. — 2012. — № 3. — С. 45–50.

40. Кудряков, О. В. Мониторинг начальных стадий эрозионного износа ионно-плазменных покрытий при каплеударном воздействии / О. В. Кудряков, В. Н. Варавка // Упрочняющие технологии и покрытия. — 2012. — № 10. — С. 40–47.

41. Варавка, В. Н. Закономерности износа стали при воздействии дискретного водно-капельного потока. Часть 1 : Начальная стадия каплеударной эрозии / В. Н. Варавка, О. В. Кудряков // Трение и износ. — 2015. — Т. 36, № 1. — С. 89–99.

42. Варавка, В. Н. Закономерности износа стали при воздействии дискретного водно-капельного потока. Часть 2 : Стадия развитой каплеударной эрозии / В. Н. Варавка, О. В. Кудряков // Трение и износ. — 2015. — Т. 36, № 2. — С. 201–212.

43. Кудряков, О. В. Механизмы и закономерности деградации поверхности стали на стадиях развитой каплеударной эрозии / О. В. Кудряков, В. Н. Варавка // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. — 2015. — № 2. — С. 100–112.

44. Маргулис, М. А. Основы звукохимии (химические реакции в акустических полях) / М. А. Маргулис. — Москва : Высшая школа, 1984. — 272 с.

45. Завилопуло, А. Н. Ионизация молекул азота, кислорода, воды и двуокиси углерода электронным ударом вблизи порога / А. Н. Завилопуло, Ф. Ф. Чипеев, О. Б. Шпеник // Журнал технической физики. — 2005. — Т. 75, вып. 4. — С. 19–24.

46. Международная база данных атомных и молекулярных констант NIST / Mallard, G., and Linstrom, P.J. NIST Standard Reference Database. — 2000. — Vol. 69. — Режим доступа: http://www.webbook.nist.gov (дата обращения : 21.10.2014).

47. Гаркунов, Д. Н. Триботехника / Д. Н. Гаркунов.— Москва : Машиностроение, 1985. — 424 с.

48. Водород в металлах / под. ред. Г. Алефельд, И. Фелькель. — Москва : Мир, 1981.

49. Колачев, Б. А. Водородная хрупкость металлов / Б. А. Колачев. — Москва : Металлургия, 1985. — 216 с.

References

1. Artemov, V.N., et al. Sravnitel'nyy analiz effektivnosti teploenergetiki Rossii i stran mira. [Comparative analysis of efficiency of the thermal engineering of Russia and countries of the world.] Vestnik MEI, 2013, no.1, pp. 9-15 (in Russian).

2. Klimenko, A.V., Grin, E.A. Obespechenie teploenergetiki konstruktsionnymi materialami — osnova ee nadezhnogo funktsionirovaniya i razvitiya. [Supplying thermal engineering with constructional materials is a basis of its proper operation and development.] Thermal Engineering, 2014, no.1, pp. 44-49 (in Russian).

3. Proceedings of 5th International Conference on Erosion by Liquid and Solid Impact. Cambridge, U.K.: Cavendish Laboratory, 1979, 86 p.

4. Springer, G.S. Eroziya pri vozdeystvii kapel' zhidkosti. [Erosion under the liquid droplets effect.] Moscow: Mashinostroenie, 1981, 200 p. (in Russian).

5. Evans, A., et al; Price, K., ed. Eroziya. [Erosion.] Moscow: Mir, 1982, 464 p. (in Russian).

6. Van der Zwaag, S., Dear, J.P., Townsend, D., and Walley, S.M. Rain and solid particle erosion damage mechanisms and materials evaluations. Cambridge, U.K.: Cavendish Laboratory, 1986. AFWAL-TR-86-4.

7. Polezhaev, Yu.V., Yurevich, F.B. Teplovaya zashchita [Thermal protection.] Moscow: Energiya, 1976, 392 p. (in Russian).

8. Polezhaev, Yu.V. Protsess ustanovleniya erozionnogo razrusheniya materiala pregrady pri mnogokratnom soudarenii chastitsami. [Development of erosional damage to the wall under multiple particle collision.] Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 1979, vol. 37, no.3, pp. 389 (in Russian).

9. Polezhaev, Yu.V., et al. Raschetnaya model' protsessa erozionnogo razrusheniya kompozitsionnogo materiala. [A predicted model for erosional damage to composites.] Journal of Engineering Physics and Thermophysics, 1979, vol.37, no. 3, pp. 395-404 (in Russian).

10. Lagerev, A.V. Veroyatnostnoe prognozirovanie erozii v sistemakh tekhnicheskoy diagnostiki vlazhnoparovykh turbomashin. [Probabilistic forecasting of erosion in systems of technical diagnostics of the moist-steam turbomachines.] Proceedings of the RAS. Power Engineering Journal, 1997, no. 2, pp. 134-143 (in Russian).

11. Dergachev, K.V. Elektronnaya sistema prognozirovaniya erozii rabochikh lopatok turbin atomnykh stantsiy. [Electronic forecasting system of erosion of turbine blades of nuclear power plants.] Proc. of Universities. Nuclear Power Engineering. 2001, no. 3, pp. 3–13 (in Russian).

12. Skotnikova, M.A., et al. Ispol'zovanie titanovykh splavov v kachestve materiala lopatok parovykh turbin. [Use of titanic alloys as material of the steam turbine blades.] Voprosy materialovedeniya, 2007, no. 3(51), pp. 61-70 (in Russian).

13. Lanina, A.A. Issledovanie vysokoskorostnogo kapleudarnogo vozdeystviya na poverkhnost' lopatok parovykh turbi.n [Research of high-speed droplet-shock impact on a surface of the steam turbine blades.] Instrument and Technologies, 2008, no. 28-29, pp. 84-87 (in Russian).

14. Seleznev, L.I., Ryzhenkov, V.A. Otsenka dlitel'nosti inkubatsionnogo perioda erozionnogo iznosa konstruktsionnykh materialov [Assessment of duration of the incubatory period of erosive wear of constructional materials.] Thermal Engineering, 2005, no.4, pp. 61-63 (in Russian).

15. Povarov, O.A., Stanisha, B., Ryzhenkov, V.A. Issledovanie erozionnogo iznosa rabochikh lopatok parovykh turbin [Research of erosive wear of the working blades of steam turbines.] Thermal Engineering, 1988, no.4, pp. 66-69 (in Russian).

16. Ivanov, V.A., Faddeev, I.P., Borovkov, V.M., Korolev, V.I. Otsenka erozionnogo iznosa lopatochnogo apparata vlazhnoparovykh turbin AES [Assessment of erosive wear of blade device of the moist-steam engines of nuclear power plants.] Coll. Sci.Papers. Moscow: Izd-vo MEI, 1999, p. 214 (in Russian).

17. Seleznev, L.I., Ryzhenkov, V.A. Erozionnyy iznos konstruktsionnykh materialov [Erosive wear of constructional materials.] Technology of Metals, 2007, no. 3, pp. 19-24 (in Russian).

18. Seleznev, L.I., Ryzhenkov, V.A., Mednikov, A.F. Fenomenologiya erozionnogo iznosa materiala konstruktsionnykh staley i splavov zhidkimi chastitsami. [Phenomenology of erosive wear of constructional steels and alloys by liquid particles.] Thermal Engineering, 2010, no.9, pp. 12-16 (in Russian).

19. Ryzhenkov, V.A., Lebedeva, A.I., Mednikov, Al.F. Sovremennoe sostoyanie i sposoby resheniya problemy erozionnogo iznosa lopatok vlazhno-parovykh stupeney turbin. [Current state and ways of solution to the erosive wear problem of blades of the moist-steam turbine sections.] Thermal Engineering, 2011, no.9, pp. 8-13 (in Russian).

20. Mednikov, A.F., Ryzhenkov, V.A., Seleznev, L.I., Lebedeva, A.I. Issledovanie protsessa izmeneniya kharakteristik rel'yefa poverkhnosti lopatochnoy stali v inkubatsionnom periode razvitiya kapleudarnoy erozii. [Research of changes of surface relief of blade steel in the incubatory period of droplet impingement erosion.] Thermal Engineering, 2012, no.5, pp. 69-75 (in Russian).

21. Min Ku Lee, Whung Whoe Kim, Chang Kyu Rhee, and Won Jong Lee. Investigation of liquid impact erosion for 12Cr steel and Stellite 6B // Journal of Nuclear Materials. — 1998. — Vol. 257. — pp. 134–144.

22. Min-Ku Lee, Whung-Whoe Kim, Chang-Kyu Rhee, and Won-Jong Lee. An analysis of stress waves in 12Cr steel, Stellite 6B and TiN by liquid impact loading. Nuclear Engineering and Design, 2002, vol. 214, pp. 183–193.

23. Haller, K.K., Ventikos, Y., Poulikakos, D., and Monkewitz, P. Computational study of High-speed liquid droplet impact. Journal of Applied Physics, 2002, vol. 92, no. 5, pp. 2821–2828.

24. Imano, A.M., and Beroual, A. Deformation of water droplets on solid surface in electric field. Journal of Colloid and Interface Science, 2006, vol. 298, pp. 869–879.

25. Mann, B.S., and Vivek, Arya. HVOF coating and surface treatment for enhancing droplet erosion resistance of steam turbine blades. Wear, 2003, vol. 254, pp. 652–667.

26. Mann, B.S., Vivek, Arya, and Pankaj, Joshi. Advanced High-Velocity Oxygen-Fuel Coating and Candidate Materials for Protecting LP Steam Turbine Blades Against Droplet Erosion. Journal of Materials Engineering and Performance, 2005, vol. 14(4), pp. 487–494.

27. Sandeep, Soni. Analysis of liquid droplet erosion for steam turbine blades of composite material. Int. J. Mech. Eng. & Rob. Res., 2012, vol. 1, no. 3, pp. 214–226.

28. Zhou, Q., Li, N., Chen, X., Yonezu, A., Xu, T., Hui, Sh., and Zhang, D. Water Drop Erosion on Turbine Blades: Numerical Framework and Applications. Materials Transactions, 2008, vol. 49, no. 7, pp. 1606–1615.

29. Zhou, Q., Li, N., Chen, X., Xu, T., Hui, S., and Zhang, D. Analysis of water drop erosion on turbine blades based on a nonlinear liquid-solid impact model. International Journal of Impact Engineering, 2009, vol.36, pp. 1156–1171.

30. Nicolici, S., Prisecaru, I., and Ghitescu, P. Study of fluid-structure interaction in liquid droplet impingement phenomena. U.P.B. Sci. Bull., Series D, 2012, vol. 74, iss. 1, pp. 148–154.

31. Keil, T., Pelz, P.F., Kadavelil, J., Necker, J., Moser, W., and Christ, D. Droplet Impact vs. Cavitation Erosion. Proceedings of WIMRC 3rd International Cavitation Forum, 4th-6th July 2011. UK: University of Warwick, 2011.

32. Kamkar, N., Bridier, F., Bocher, P., and Jedrzejowski, P. Water droplet erosion mechanism in rolled Ti–6Al–4V. Wear of Materials, 2013, vol. 301, iss.1–2, pp. 442–448.

33. Tobin, E.F., Young, T.M., Raps, D., and Rohr, O. Comparison of liquid impingement results from whirling arm and water-jet rain erosion test facilities. Wear, 2011, vol.271, pp. 2625–2631.

34. Tobin, E.F., Young, T.M., and Raps, D. Evaluation and correlation of inter-laboratory results from a rain erosion test campaign. Proceedings of 28th International Congress of the Aeronautical Sciences, 2012.

35. Fujisawa, N., Morita, R., Nakamura, A., and Yamagata, T. Critical Consideration on Wall Thinning Rate by Liquid Droplet Impingement Erosion. Journal of Advanced Maintenance, 2012, vol. 4, no. 2, pp. 79–87.

36. Hattori, S., and Takinami, M. Comparison of cavitation erosion rate with liquid impingement erosion rate. Wear, 2010, vol. 269, pp. 310–316.

37. Kudryakov, O.V., Varavka, V.N. Mekhanizmy formirovaniya erozionnogo iznosa metallicheskikh materialov pri vysokoskorostnykh kapel'nykh soudareniyakh: Chast' 1 [Mechanisms of forming erosive wear of metal materials at high-speed liquid droplet impacts: Part 1.] Materialovedenie, 2012, no.5, pp. 36-43 (in Russian).

38. Kudryakov, O.V., Varavka, V.N. Mekhanizmy formirovaniya erozionnogo iznosa metallicheskikh materialov pri vysokoskorostnykh kapel'nykh soudareniyakh: Chast' 2 [Mechanisms of forming erosive wear of metal materials at high-speed liquid droplet impacts: Part 2] Materialovedenie, 2012, no.6, pp. 14-19 (in Russian).

39. Varavka, V.N., Kudryakov, O.V. Osobennosti razrusheniya metallicheskikh splavov v usloviyakh ustoychivoy kapleudarnoy erozii. [Features of destruction of metal alloys under the conditions of steady droplet-shock erosion.] Izvestiya vuzov. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki, 2012, no. 3, pp. 45-50 (in Russian).

40. Kudryakov, O.V., Varavka, V.N. Monitoring nachal'nykh stadiy erozionnogo iznosa ionno-plazmennykh pokrytiy pri kapleudarnom vozdeystvii [Monitoring of initial stages of erosive wear of ion-plasma coatings at droplet-shock impacts.] Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya, 2012, no. 10, pp. 40-47 (in Russian).

41. Varavka, V.N., Kudryakov, O.V. Zakonomernosti iznosa stali pri vozdeystvii diskretnogo vodno-kapel'nogo potoka. Chast' 1: Nachal'naya stadiya kapleudarnoy erozii. [Regularities of steel wear at impact of discrete water-droplet stream. Part 1: Initial stage of droplet-shock erosion.] Friction and Wear, 2015, vol. 36, no. 1, pp. 89-99 (in Russian).

42. Varavka, V.N., Kudryakov, O.V. Zakonomernosti iznosa stali pri vozdeystvii diskretnogo vodno-kapel'nogo potoka. Chast' 2: Stadiya razvitoy kapleudarnoy erozii [Regularities of steel wear at impact of discrete water-droplet stream. Part 2: Stage of developed droplet-shock erosion.] Friction and Wear, 2015, vol. 36, no. 2, pp. 201-212 (in Russian).

43. Kudryakov, O.V., Varavka, V.N. Mekhanizmy i zakonomernosti degradatsii poverkhnosti stali na stadiyakh razvitoy kapleudarnoy erozii. [Mechanisms and laws of steel surface degradation during the stages of developed droplet erosion.] Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques, 2015, no. 2, pp. 100–112 (in Russian).

44. Margulis, M.A. Osnovy zvukokhimii (khimicheskie reaktsii v akusticheskikh polyakh) [Fundamentals of sound chemistry (chemical reactions in acoustic fields).] Moscow: Vysshaya shkola, 1984, 272 p. (in Russian).

45. Zavilopulo, A.N., Chipeev, F.F., Shpenik, O.B. Ionizatsiya molekul azota, kisloroda, vody i dvuokisi ugleroda elektronnym udarom vblizi poroga [Ionization of molecules of nitrogen, oxygen, water and carbon dioxide in electronic blow near threshold.] Journal of applied physics, 2005, vol. 75, iss. 4, pp. 19-24 (in Russian).

46. Mallard, G., and Linstrom, P.J. International database of nuclear and molecular constants NIST. NIST Standard Reference Database. 2000, vol. 69. Available at: http://www.webbook.nist.gov (accessed: 21.10.2014).

47. Garkunov, D.N. Tribotekhnika. [Tribology.] Moscow: Mashinostroenie, 1985, 424 p. (in Russian).

48. Alefeld, G., Felkel, I., eds. Vodorod v metallakh. [Hydrogen in metals] In 2 vol. Moscow: Mir, 1981. (in Russian).

49. Kolachev, B.A. Vodorodnaya khrupkost' metallov [Hydrogen fragility of metals.] Moscow: Metallurgiya, 1985, 216 p. (in Russian)

Поступила в редакцию 27.10.2015
Сдана в редакцию 28.11.2015
Запланирована в номер 22.02.2016

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 62–50 DOI 10.12737/18262

Мониторинг состояния многооперационных станков на базе концепции e-Mind Machine*

А. К. Тугенгольд[1], Р. Н. Волошин[2], С. В. Ющенко[3]**
[1,2,3] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Monitoring of multioperational machines based on the concept of e-Mind Machine***

A. K. Tugengold[1], R. N. Voloshin[2], S. V. Yushchenko[3]**
[1,2,3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Рассматривается концепция e-Mind Machine, системы, осуществляющей мониторинг состояния многооперационных станков. Проводится анализ существующих зарубежных и отечественных систем мониторинга, а также необходимых аспектов мониторинга, определяющих особенность e-Mind Machine. Представлена структура организации модуля e-Mind Machine. Обоснована необходимость преобразования данных диагностики в систему знаний при работе перспективных систем мониторинга состояния многооперационных станков. Определяются преимущества использования методов прогнозирования. Введены новые понятия, такие как нечеткая граница общей работоспособности/безотказности и нечеткая граница параметрической безотказности работы. Показано, что использование интеллектуального управления открывает новые возможности для автоматизации мониторинга. Применение модуля e-Mind Machine как бортовой интеллектуальной системы позволяет достичь максимальной эффективности обработки деталей и безотказности функционирования в сочетании с возможностями самообслуживания станка.

Ключевые слова: автоматизированная система мониторинга, диагностика, обслуживание, e-Mind Machine, нечеткая граница общей работоспособности/безотказности, нечеткая граница параметрической безотказности работы, ширина пограничной полосы.

The concept of e-Mind Machine, a system that monitors the status of multioperational machines, is considered. The existing international and domestic monitoring systems, as well as the essential aspects of monitoring specifying e-Mind Machine features are analyzed. The structure of the e-Mind Machine module organization is presented. The need for converting test data into a knowledge system when the perspective monitoring systems operate at the multioperational machines is justified. Benefits of the forecasting methods application are determined. New concepts such as fuzzy boundary of operability/reliability and fuzzy boundary of parametric uptime are introduced. It is shown that the use of the intelligent control opens up fresh opportunities for the monitoring automation. The application of the e-Mind Machine module as an onboard intelligent system maximizes the part-processing efficiency and reliability in combination with the machine self-service.

Keywords: automated monitoring system, diagnostics, maintenance, e-Mind Machine, fuzzy boundary of operability/reliability, fuzzy boundary of parametric uptime, width of boundary strip.

Введение. Повышенные требования к качеству металлорежущих станков в современных условиях компьютеризированного производства обусловлены рядом объективных причин. К ним относятся большая стоимость станков, соответствующих повышенным требованиям к точности и сложности обработки деталей, высокая производительность с возможностью использования прогрессивных инструментов и высокоскоростных режимов резания, высокая надежность. Внимание мировой научной общественности к проблемам повышения надежности станков, их безотказной работы связано с объективно уменьшающейся долей трудоспособного населения, занятого в машиностроении, повышением уровня автоматизации и нехваткой квалифицированных операторов. Любая потеря работоспособности таких станков приводит к большим экономическим потерям и сбоям во всей технологической цепочке. Так, по данным [1] для поддержания текущей работоспособности, поднастройки технологической системы и устранения причин

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: akt0@yandex.ru, r.voloshin2909@gmail.com, xgridx@yandex.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

возможных отказов приходится вмешиваться в работу станка по управляющей программе в период от 7 до 22 минут с момента начала операции обработки.

Существенный вклад в решение проблем повышения качества станков с ЧПУ внесен в ходе выполнения ряда мировых проектов [2]. С конца 90-х годов прошлого века экономически развитые государства, такие как США, Япония, Канада, Германия, Швейцария принимают участие в реализации проекта SIMON (Sensor Fused Intelligent Monitoring System for Machining), который является одной из составных частей программы создания технологий XXI века. Широкий спектр важных решаемых задач нацелен на создание универсальных интерфейсов, систем и алгоритмов обслуживания и управления процессами, станками и системами ЧПУ. Создание целостных систем «станок + поддерживающие его сервисы» соответствует современным требованиям и возможностям. Предполагается, что использование знаний пользователей-производственников и интеллектуальные алгоритмы будут играть ключевую роль в совершенствовании станочных систем и в итоге позволят прийти к обработке с высокой точностью, высокой производительностью и минимальными потерями от неисправностей.

Ряд программ исследований и разработок нацелен на повышение уровня автоматизации обслуживания машин различного назначения. Среди них стоит выделить системы IMS, PROMISE. Цель выполнения проекта IMS (Intelligent Maintenance System) состояла в разработке нового поколения систем сбора, обработки и управления потоком информации о техническом состоянии машины, а также в обеспечении непрерывного электронного преобразования данных и информации в знания и принятие решений [3, 4]. Так как появление в механизмах машин сбоев может привести не только к большим затратам, но и катастрофическим ситуациям, нужна система, способная анализировать поведение машины с помощью датчиков и использовать собранные данные, чтобы предусмотреть и предотвратить потенциальные отказы.

Центр интеллектуальных систем технического обслуживания (IMS-центр), объединивший университетский совместный исследовательский центр (университеты Цинциннати, штата Мичиган, университет науки и технологии Миссури) и промышленные предприятия, начиная с 2001 года стал лидером в продвижении методов, средств и технологий интеллектуальных систем технического обслуживания для достижения и поддержания безотказной работы машин. Методы и технологии, разработанные IMS-центром, были внедрены в более чем 70 проектов, осуществляемых совместно научно-исследовательскими и промышленными партнерами по всему миру, в том числе известный проект "5S" [5].

Еще одним примером современных разработок типовых систем в области непрерывного наблюдения и оценки состояния машин является интеллектуальная система WatchDog Agent, разработанная крупными промышленными корпорациями и университетами и ориентированная на работу с различным технологическим оборудованием [6, 7]. К основным свойствам этой системы относятся:

1. Преобразование полученных от датчиков данных в базу знаний и синхронизация полученных решений с удаленными системами;
2. Создание встроенных алгоритмов прогнозирования для оценки состояния и предотвращения снижения производительности;
3. Информационные программные и аппаратные платформы, которые позволяют продукту перенастраиваться и поддерживать систему в работоспособном состоянии без внешних воздействий;
4. Встроенный контроль и предоставление информации о жизненном цикле оборудования для производства по замкнутому циклу.

К отечественным разработкам в области организации управления техническим обслуживанием и ремонтом относится система TRIM-PMS [8]. Система TRIM-PMS (Planned Maintenance System) является программно-методической платформой, с помощью которой предприятия могут повысить управляемость и эффективность процессов технического обслуживания и ремонта. Система TRIM-PMS — это фиксированный набор взаимосвязанных и готовых к использованию программно-методических средств, объединенных единой концепцией организации, проведения, оценки и анализа системы технического обслуживания и ремонта.

Таким образом, вопрос построения систем технического обслуживания и ремонта в приложении к многооперационным станкам (МОС) компьютеризированного производства остается по-прежнему актуальным. В настоящей работе представлены основные положения по организации и управлению состоянием МОС на базе концептуальной разработки модуля e-Mind Machine и ее блока Состояние станка.

Структура модуля e-Mind Machine. Создание интеллектуального модуля «умной машины» в составе УЧПУ станка или в числе поддерживающих сервисов, является важным этапом на пути формирования единой среды эксплуатации, программирования и технического обслуживания станков, в том числе многооперационных, и другого мехатронного технологического оборудования на различных предприятиях и от различных производителей.

Основу интеллектуальной платформы модуля e-Mind Machine составляет система знаний (СЗ) [9–10], включающая совокупность блоков, в число которых входят блоки: Процесс обработки, Состояние станка, Инструмент,

Заготовка-деталь и Информационный обмен (рис. 1). Сформированный подход создает возможность управления МОС путем непосредственного внесения коррекций в УЧПУ за счет информационной и интеллектуальной поддержки на базе собственной СЗ о состоянии элементов станочной системы. При системном подходе к формированию СЗ использовались следующие принципы:

- Автономность и высокий уровень интеллектуальности МОС, определяющие принцип полноты интеллектуальных функций вследствие реализации всего объема процедур принятия решений при управлении.
- Направленность действий, связанных с контролем выполнения реализуемых задач на пути достижения цели.
- Синтез образов состояния МОС и среды за счет экспертной оценки, ранжирования по уровням и обобщения ситуаций, выработка оценки тех факторов, по которым не удается получить данные сенсорного восприятия.
- Открытость системы за счет восприятия и оценки информации по состоянию самого объекта, процесса, результата и внешней среды; коррекция действий МО.
- Иерархичность структуры принятия решений по планированию и управлению. Подчиненность друг другу задач регулирования, планирования действий и выбора стратегии поведения.
- Обучаемость ИСУ за счет реализации процедур обучения и самообучения, совершенствование в целях повышения интеллектуальности и качества функционирования.

СЗ использует различные методы интеллектуального анализа данных, в том числе нечетких множеств, нечеткой логики и нейросетевых алгоритмов [11].

Важнейшим блоком модуля является Процесс обработки. Решаемая в рамках блока задача повышения технологических качеств станка (производительности и точности обработки) приводит к необходимости планирования операций управления по состояниям $C_p(U)$ продукта (заготовка > деталь) и по подзадачам в пространстве состояний технологической системы (ТС) [12].

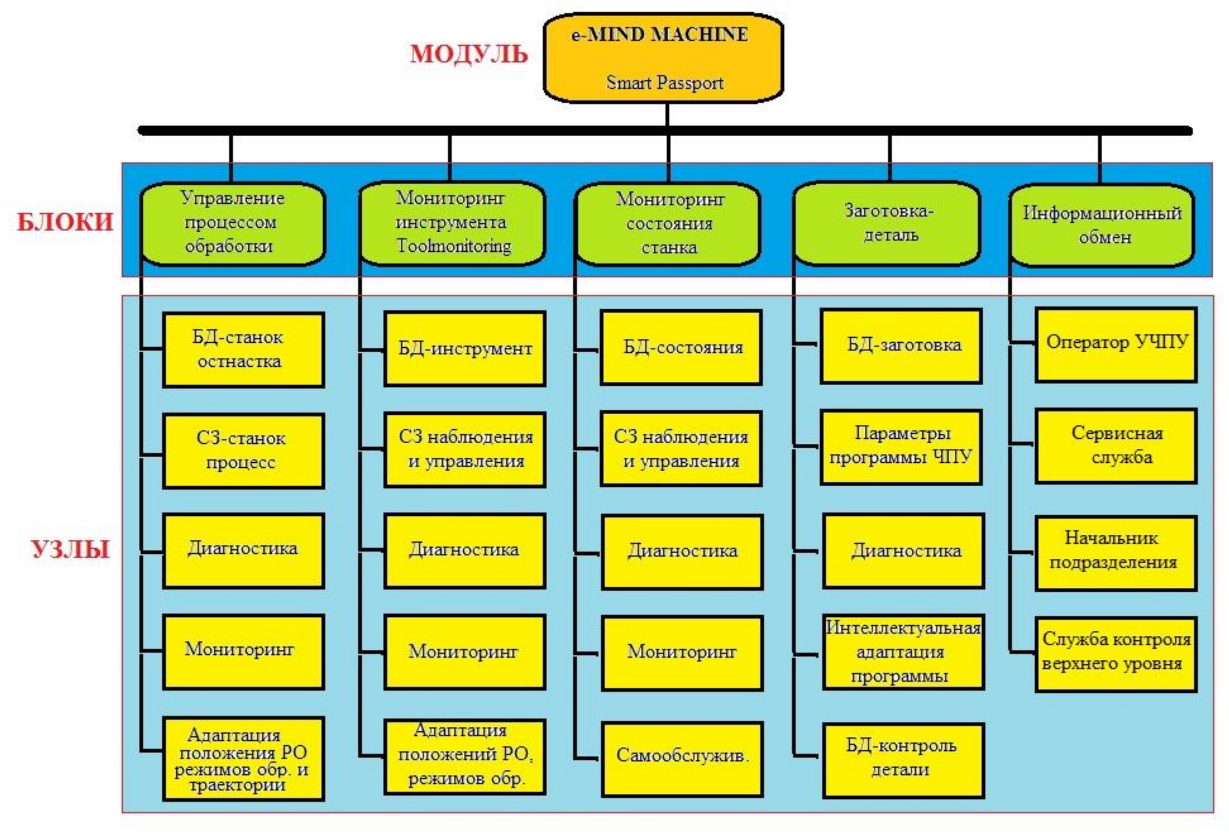


Рис. 1. Структура модуля e-Mind Machine

Целесообразное преобразование ситуаций неразрывно связано с изменением состояний ТС, переходы между которыми определяются допустимыми управляющими воздействиями, которыми обладает МОС.

При необходимости использования методов интеллектуального управления СЗ осуществляется поиск совокупности управляющих решений, обеспечивающих преобразование гипотетически выявленного пространства состояний (на основе экспертных представлений, наследуемых и оперативных параметров СЗ) к заданному целевому. Этот поиск осуществляется исходя из анализа знаний о функциональных возможностях конкретной ТС как индивида:

$$C_p^* C_p\,(u, U, C_{pg}, C_{\ p}) : C_p^* \Rightarrow C_{pg},$$

где C_p* — гипотетически выявленный класс состояний продукта; C_{pg}, C_p — целевое состояние и общая совокупность состояний продукта; U, u — множество управляющих воздействий и синтезируемое управление.

Такой подход позволяет сформулировать гипотезу об организации целесообразного поведения TC [13].

Блок Инструмент представлен в работах [14, 15], где приведены принципы построения и функционирования системы наблюдения за состоянием инструментов и управления инструментальным обеспечением на станках в компьютеризированном производстве. Предложенный подход ориентирован на создание условий для эффективного функционирования и управления состоянием инструментов с помощью СЗ блока Инструмент.

Основные принципы функционирования блока Состояние станка. Основная функция этого блока заключается в мониторинге состояния устройств (подсистем) МОС и предупреждения нарушений работоспособности. В приложении к концепции рассматриваемого проекта e-Mind Machine (e-ММ) в функции мониторинга включены следующие процедуры: наблюдение за состоянием МОС по критериям работоспособности, наблюдение за изменением и развитием процессов, происходящих в устройствах станка, их оценивание, прогнозирование и принятие оперативных и тактических решений для выполнения действий по поддержанию надежности. Из общего определения работоспособности машин следует, что это состояние машины, при котором она способна выполнять заданные функции, сохраняя значения заданных параметров в пределах, установленных нормативной технической документацией, а работоспособность станка — способность бесперебойно выпускать годную продукцию в заданном количестве в течение определенного срока.

Блок мониторинга состояния МОС в e-ММ станка соответствующей подсистемы СЗ включает совокупность данных и знаний по состоянию станка S_m:

$$S_m; Q_j \to Q_l; L_i; U_k,$$

где L_i — изменения, которые нужно внести в описание состояния станка на стадии преобразования i после того, как текущая ситуация Q_j перешла в текущую ситуацию Q_l при принятом решении и соответствующем управлении U_k, U_k € U_s, причем U_s — вектор управлений состоянием станочной системы.

В СЗ вектор U_s формируется на основе логико-трансляционных или корреляционных правил выводов для управления преобразованиями состояний S_m. При этом

$$S_m = (S_1, S_2, S_3, \ldots, S_z, U_s), \tag{1}$$

где S_1, S_2, S_3, ..., S_z — векторы состояния устройств (подсистем) станочной системы.

Каждый вектор S_i (1) формируется совокупностью данных и знаний, полученных в результате стационарных и динамических испытаний/измерений (2).

Эта совокупность включает следующие множества: наследуемое X_{hi} — по стационарным испытаниям; априорное X_{ai} и оперативное X_{oi} — по динамическим испытаниям:

$$\begin{cases} S_i = (X_{hi}, X_{hi}, X_{hi}); \\ X_{hi} = (x_{hi1}, x_{hi2}, \ldots, x_{him}); \\ X_{ai} = (x_{ai1}, x_{ai2}, \ldots, x_{ain}); \\ X_{oi} = (x_{oi1}, x_{oi2}, \ldots, x_{oip}). \end{cases} \tag{2}$$

Наследуемое X_h и априорное X_a множества составляют элементы накопленного опыта.

Такое представление множеств наблюдаемых данных (2) позволяет синтезировать суждение о влиянии факторов на общую работоспособность МОС, а также дает возможность получения соответствующих знаний об эволюции изменений в состоянии станка и необходимости проведения операций обслуживания. Под наследуемым множеством X_{hi} подразумевается совокупность m значений факторов подсистемы i, знания о которых получают вне периода процесса обработки детали, а именно при приемо-сдаточных, тестовых или периодических измерениях, в том числе при контроле качества обработанной детали. Совокупность n значений факторов, измеренных в процессе обработки деталей в период, предшествующий текущему оперативному времени, принадлежит множеству X_{ai} (как накопленный опыт), а p значений отнесено к оперативному множеству X_{oi}. Одна из причин такого деления факторов заключается в ограниченной возможности получения и нечеткости динамической информации от средств контроля непосредственно в процессе обработки деталей.

Структура блока мониторинга состояния станка представлена на рис. 2.



Рис. 2. Структура блока мониторинга состояния МОС

Ниже перечислены основные аспекты, присущие мониторингу.

Диагностика состояния станка (самодиагностика) формирует исходную информацию по факторам множеств X_{ai} и X_{oi} за счет непрерывных наблюдений и измерений, которые выполняет узел диагностики. Анализ диагностических признаков или комплексов диагностических признаков производится с целью определения природы неисправности или отказа (вида, места, степени развития).

Для каждого устройства станка используются специфические методы распознавания повреждений, выполняющие определенный круг задач по контролю и диагностированию состояния. Диагностируются тепловые деформации шпинделя и несущих деталей станка, силовые процессы, процессы в гидроприводах, механизмах подачи и других узлах станка, устройствах электроавтоматики и УЧПУ.

Следующий аспект мониторинга состояния — это идентификация и распознавание полученных данных о фактическом состоянии станка. Выявление закономерностей и причинно-следственных связей между полученными данными, а также их классификация позволяют использовать эту информацию в дальнейшем. Для этого в блоке выполняется преобразование получаемой информации в знания по оценке динамики происходящих деградационных изменений состояния, необходимые для выполнения действий по обеспечению работоспособности МОС, режимам обслуживания станка и пр. Одним из подходов к такому преобразованию информации по множествам измеряемых параметров рекомендуется метод интеллектуального анализа данных — Data Mining [16], на базе которого выполняется фильтрация и агрегирование данных для преобразования в знания.

Прогнозирование технического состояния — это процесс определения технического состояния объекта на период, следующий за текущим моментом времени, с учетом предыстории изменения параметров, характеризующих техническое состояние. Информация о поведении машины в прошлом служит базой для прогнозирования изменения состояния станка. Решение задачи прогноза выполняется в виде реализации следующих этапов: разработка модели исследуемого процесса и математического описания; получение результатов контроля и предварительная обработка; определение характеристик прогнозируемого процесса [17].

Важнейшим результатом прогнозирования является оценка периода времени до нарушения работоспособности станка. В связи с многочисленностью и нестационарностью действующих факторов, влияющих на изменение параметров совокупности устройств станка, время нарушения работоспособности станка является случайной величиной. Статистические методы позволяют оценить время наступления параметрических и/или функциональных отказов T_{ij} детали/элемента j в устройстве i с некоторой долей вероятности при проведении специальных долговременных исследований. В производственных условиях эксплуатации многооперационных станков с ЧПУ такая возможность отсутствует. Возможным решением данной проблемы является применение диагностики состояния устройств/узлов станка и экспертных знаний специалистов на основе полученного опыта с использованием методологии искусствен-

ного интеллекта, в том числе нечетких знаний и нечеткой логики. Предлагаемой методической основой оценки состояний машины и ее узлов могут служить вводимые ниже понятия.

В системе e-Mind Machine понятия нечетких границ работоспособности (безотказной работы) введено как обобщение понятия условной границы стойкости, используемое при решении задач управления состоянием инструментов [14]. Это условное значение в периоде безотказной работы на некотором интервале времени. В соответствии с теорией нечетких множеств *Л.* Заде используются представления нечеткой границы и нечеткой пограничной полосы стойкости, проиллюстрированные на рис. 3.

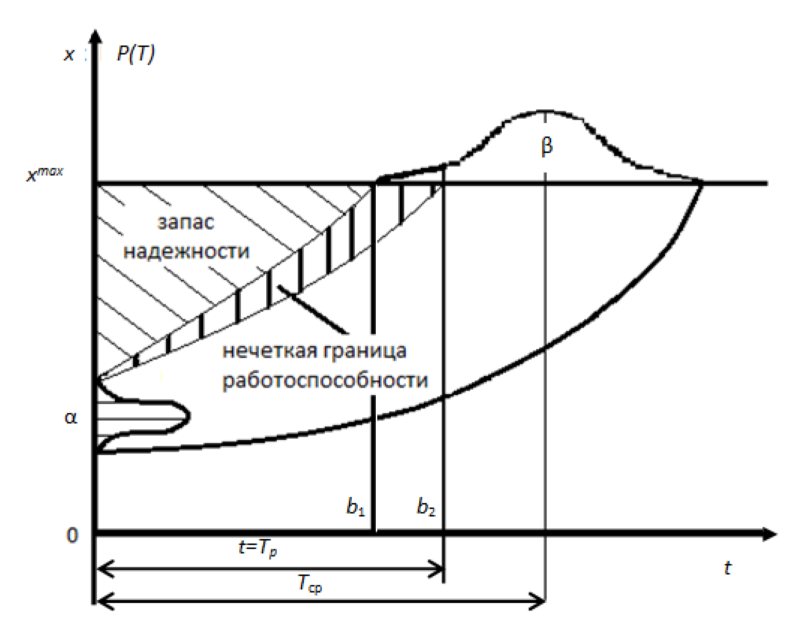


Рис. 3. Схема для определения нечеткой границы работоспособности.
α — начальное распределение параметров исследуемого узла; β — распределение времени отказа;
T_p — время достижения предельного значения x^{max} с нормируемой вероятностью; T_{cp} — среднее время до отказа;
b_1 и b_2 — предельные значения пограничной полосы работоспособности.

В разработанной методике для этих понятий введены следующие термины:

- нечеткая граница общей работоспособности/безотказности (до наступления отказа функционирования станка /узла устройства /элемента) — Fuzzy boundary of operability (FBO), представленная на рис. 3;
- нечеткая граница параметрической безотказности работы (до наступления параметрического отказа станка /узла /устройства /элемента) — Fuzzy boundary of parametric operability (FBPO);
- ширина пограничной полосы — Width of the fuzzy boundary (WFBO, WFBPO).

Ширина полосы характеризуется доверительным интервалом, который на основе экспертных оценок отображает допустимую возможность работы машины без наступления рассматриваемого вида отказа при непрерывном контроле состояния МОС. Понятие «ширина пограничной полосы» согласуется с представлениями о *P*-доверительном интервале, введенном в математической статистике *Е*. Нейманом.

Введение указанных представлений связано также с нецелесообразностью прерывания резания в связи с наступлением граничного состояния *FB* при незавершенной обработке поверхности детали. Адаптация режимов обработки для снижения интенсивности процессов, приводящих к нарушению работоспособности, и/или непрерывный контроль процесса резания при работе в пограничной полосе позволяют исключить возможный брак обрабатываемой детали из-за параметрических или функциональных отказов станочной системы.

Для оценки временных параметров FBO и FBPO нечетких границ безотказного функционирования устройств станка и его узлов можно рекомендовать методы, приведённые в работах [15, 18], а именно статистический, ускоренных испытаний, нейронечетких сетей и нечетких экспертных знаний. При этом целесообразно сохранить возможность корректировки указанных параметров времени в зависимости от специфики узлов, устройств или элементов и учитывать их при обобщении полученного опыта эксплуатации станка.

Заключительным аспектом процесса мониторинга состояния является выработка и принятие оперативных и тактических решений по управлению состоянием МОС [11].

Как было указано, в структуре блока мониторинга предусмотрен узел диагностики состояния МОС. Узел диагностики в связи с многообразием выполняемых функций можно представить в виде системы, состоящей из приведенных в квалификационном перечне подсистем:

По применяемым методам:

1. Инструментальный метод диагностирования с помощью информационных сенсоров и приборов применяется для оценки технического состояния различных систем на основе анализа параметров давления и температуры; температуры охлаждающей системы в различных узлах; электроэнергии, потребляемой двигателями и т. п. В дополнение к этим параметрам могут измеряться температура подшипников, давление масла, уровень вибрации. Метод позволяет также отслеживать техническое состояние устройств станка в реальном времени.

2. Диагностика статической и динамической согласованности работы узлов и рабочих органов. В процессе испытания проводится контроль круговой траектории, выполняемой согласованными действиями приводов станка. Метод позволяет определить неисправности станка по различным параметрам и оценивать технологическую точность станка. Среди вышеупомянутых параметров — люфты по каждой координате, боковые люфты, рассогласование скорости приводов, неперпендикулярность осей, непараллельность по каждой оси.

По применяемым средствам диагностирования:

1. Датчики колебаний — акселерометры.
2. Тензометрические и пьезометрические датчики измерения сил и колебаний.
3. Терморезисторы и тепловизоры.
4. Приборы технического зрения.
5. Индукционные датчики.
6. Ультразвуковые датчики.

По виду представления информации в СЗ:

1. БЗ диагностических признаков отказов.
2. БЗ возможных повреждений в узлах и деталях, уровней их допустимых значений.

Также рассматривается классификация по виду узлов и оборудования станка (рис. 4.).

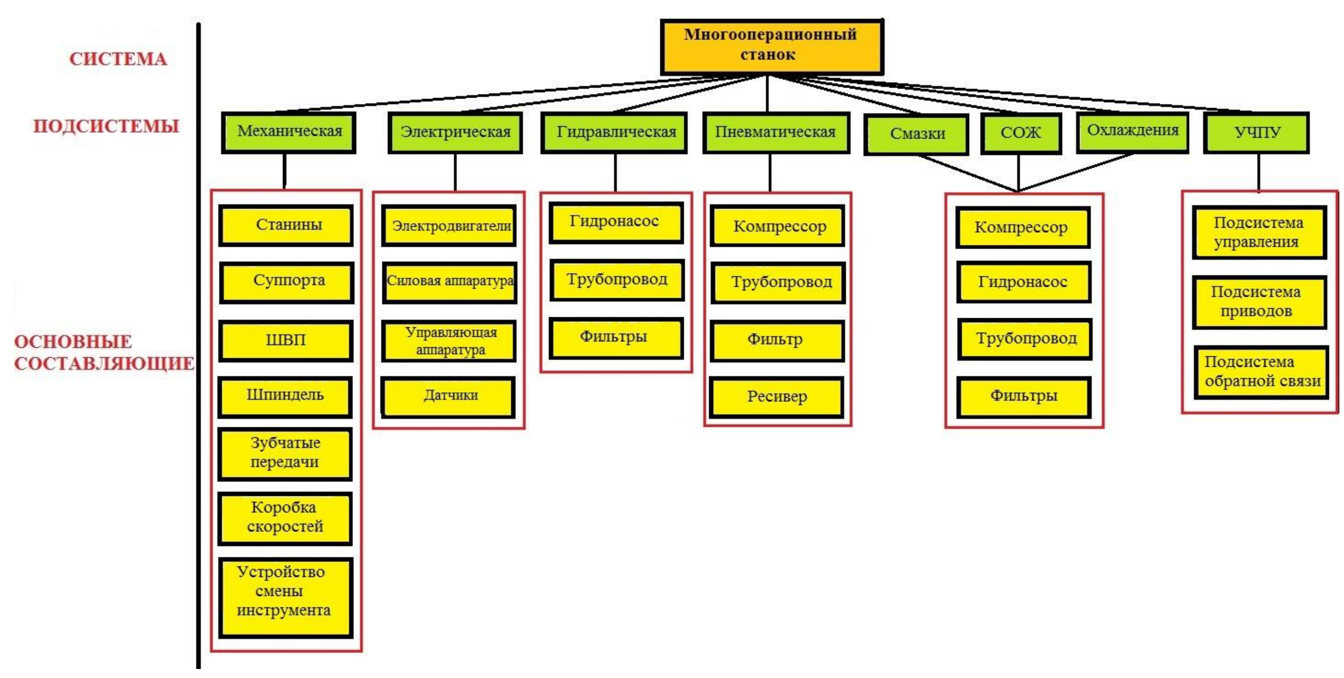


Рис. 4. Классификация по виду узлов и устройств станка

Система e-Mind Machine позволяет осуществить информационное обеспечение обслуживающего персонала МОС. Предусмотрен типовой набор средств отображения функций мониторинга состояния станка, в том числе с помощью телекоммуникационных систем и беспроводной передачи данных: экранное отображение в режиме реального времени, архивы штатных и нештатных ситуаций, баз данных и знаний, аудио/визуальное представление сигнальной информации, планы внешнего обслуживания.

Выводы. Приведены основные положения концептуального подхода к техническому обслуживанию МОС, в котором бортовая интеллектуальная система управления e-Mind Machine применена для достижения максимальной эффективности обработки деталей и безотказности функционирования в сочетании с возможностями самообслуживания станка. Задача решается путем использования данных из предыстории работы станка, преобразования данных диагностики в знания о текущем состоянии, отслеживания технического состояния станка в реальном времени, прогнозирования и поддержки принятия решений для предотвращения возможных отказов. Сформированы этапы процесса мониторинга состояния МОС, включающие формирование исходной диагностической информации, идентифи-

кацию и распознавание полученных данных о фактическом состоянии станка, прогнозирование технического состояния, а также выработку и принятие решений по управлению состоянием МОС. Для оценки надежности станочной системы при мониторинге создана методика, в которой использованы впервые введенные показатели: нечеткая граница общей работоспособности /безотказности FBO, нечеткая граница параметрической безотказности работы FBPO и ширина пограничной полосы WFBO, WFBPO. Эти показатели могут быть использованы при анализе надежности машин самого различного назначения. Совокупность методов и средств узла диагностики в структуре модуля e-Mind Machine представлена соответствующей классификацией.

Библиографический список

1. Григорьев, С. Н. Повышение производительности фрезерования с помощью диагностирования состояния инструмента с учетом достоверности отображения состояния объекта по критерию его отказа / С. Н. Григорьев, В. Д. Гурин, Н. Ю. Черкасова // Вестник Моск. гос. техн. ун-та «Станкин». — 2011. — 3(15). — С. 44–48.

2. Sensor Fused Intelligent Monitoring System for Machining (SIMON) project from Intelligent Manufacturing Systems (IMS). 2.4.32.2-Final-Report-SIMON. http://www.ims.org/2012/11/simon-sensor-fused-intelligent- monitoring-system-for-machining/ (дата обращения: 03.12.2014).

3. Maintenance: Changing Role in Life Cycle Management / J. Lee, F. Kimura, van Houten F.J.A.M., E. Westkamper, M. Shpitalni, D. Ceglarek , S. Takata // CIRP annals. 2004, vol. 53, n°2. P. 643–655].

4. Соколов, Б. В. Анализ возможных путей внедрения концепции CL_2M при разработке программных систем / Б. В. Соколов, М. Ю. Охтилев, А. И. Птушкин // Системы проектирования, технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD/CAM/PDM–2010) : сб. трудов 10-й междунар. конф. — Москва, 2010 г. — С. 314–317.

5. Center for Intelligent Maintenance Systems. www.imscenter.net/ (дата обращения: 24.09.2015 г.)

6. Lee, J. Watchdog Agent—an infotronics-based prognostics approach for product performance degradation assessment and prediction/ J. Lee, J Ni, D Djurdjanovic, //Advanced Engineering Informatics 17 (3), 109-125

7. Ni, J. Watchdog–information technology for proactive product maintenance and its implications to ecological product re-use. / J. Ni, J. Lee, D. Djurdjanovic. //Proceedings of Colloquium on E-Ecological Manufacturing. p. 101-110.

8. Enterprise Asset Management. Системы управления основными фондами предприятия. www.tadviser.ru/index.php/Продукт:TRIM-PMS_%28 Planned_Maintenance_System%29. (дата обращения: 24.09.2015 г.)

9. Самодуров, Г. В. Принципы построения интеллектуальной электронной документации станка / Г. В. Самодуров, А. К. Тугенгольд, Н. П. Юденков, Е. А. Лукьянов // СТИН. — 2012. — № 7. — С. 15.

10. Тугенгольд, А. К. К вопросу формирования системы знаний при интеллектуальном электронном документировании мехатронных объектов / А. К. Тугенгольд, А. С. Тишин, А. Ф. Лысенко // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2012. — № 3. — С. 30–36.

11. Тугенгольд, А. К. Smart-Passport открытой мехатронной технологической системы / А. К. Тугенгольд // Интеллектуальная электронная документация. — 2013. — С. 83.

12. Тугенгольд, А. К. Оценка ситуации и принятие решений интеллектуальной системой управления технологическим объектом / А. К. Тугенгольд // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2010. — Т. 10. — № 6. — С. 860–867 .

13. Поспелов, Д. А. Ситуационное управление: теория и практика / Д. А. Поспелов. —Москва : Наука, 1986. — 228 с.

14. Тугенгольд, А. К. Принципы концептуального подхода к созданию подсистемы "ИНСТРУМЕНТ" в смарт-паспорте многооперационного станка / А. К. Тугенгольд, А. И. Изюмов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2014. — Т. 14. — № 2. — С. 74–83.

15. Тугенгольд, А. К. Оценка нечеткой границы стойкости инструмента многооперационного станка / А. К. Тугенгольд, К. Г. Шучев, А. И. Изюмов, Д. Ю. Терехов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2015. — № 2(81). — С. 33–41.

16. Тугенгольд, А. К. Интеллектуальные функции и управление автономными технологическими мехатронными объектами / А. К. Тугенгольд, Е. А. Лукьянов. — Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2013. — 203 с.

17. Кравченко, В. М. Техническое диагностирование механического оборудования / В. М. Кравченко, В. А. Сидоров, В. Я. Седуш. — Донецк : Юго-Восток Лтд, 2009. — 459 с.

18. Димитров, В. П. Методика оценки согласованности моделей нечетких экспертных знаний / В. П. Димитров, Л. В. Борисова, И. Н. Нурутдинова // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2010. — № 2 (45). — С. 205–216.

References

1. Grigoryev, S.N., Gurin, V.D., Cherkasova, N.Y. Povyshenie proizvoditel'nosti frezerovaniya s pomoshch'yu diagnostirovaniya sostoyaniya instrumenta s uchetom dostovernosti otobrazheniya sostoyaniya ob"ekta po kriteriyu ego otkaza. [Milling performance increase by instrument status diagnosis taking into account the validity of the object state display through its failure criterion.] Vestnik “MSTU “STANKIN”, 2011, no. 3(15), pp. 44–48 (in Russian).

2. Sensor Fused Intelligent Monitoring System for Machining (SIMON) project from Intelligent Manufacturing Systems (IMS). 2.4.32.2-Final-Report-SIMON. http://www.ims.org/2012/11/simon-sensor-fused-intelligent- monitoring-system-for-machining/ (accessed: 03.12.2014).

3. . Takata, S., Kimura, F., van Houten, F.J.A.M., Westkamper, E., Shpitalni, M., Ceglarek, D., Lee, J. Maintenance: Changing Role in Life Cycle Management. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 2004, vol. 53, no. 2, pp. 643–655].

4. Sokolov, B.V., Okhtilev, M.Y., Ptushkin, A.I. Analiz vozmozhnykh putey vnedreniya kontseptsii CL2M pri razrabotke programmnykh system. [Analysis of possible ways to introduce CL_2M concept under the development of software systems.] Sistemy proektirovaniya, tekhnologicheskoy podgotovki proizvodstva i upravleniya etapami zhiznennogo tsikla promyshlennogo produkta (CAD/CAM/PDM–2010): sb. trudov 10-y mezhdunar. konf..[Systems of design, production engineering, and industrial product (CAD/CAM/PDM–2010) life cycle management: Proc. X Int. Conf.] Moscow, 2010, pp. 314–317 (in Russian).

5. Center for Intelligent Maintenance Systems. www.imscenter.net/ (accessed: 24.09.2015).

6. Djurdjanovic, D., Lee, J., Ni, J. Watchdog Agent—an infotronics-based prognostics approach for product performance degradation assessment and prediction. Advanced Engineering Informatics, vol. 17, iss. 3-4, pp. 109-125.

7. Ni, J., Lee, J., Djurdjanovic, D. Watchdog–information technology for proactive product maintenance and its implications to ecological product re-use. Proceedings of Colloquium on E-Ecological Manufacturing. Technical University of Berlin, Germany, 2003, pp. 101-110.

8. Enterprise Asset Management. Sistemy upravleniya osnovnymi fondami predpriyatiya. Available at: www.tadviser.ru/index.php/Продукт:TRIM-PMS_%28 Planned_Maintenance_System%29. [Asset management systems of the enterprise.] (accessed: 24.09.2015) (in Russian).

9. Samodurov, G.V., Tugengold, A.K., Yudenkov, N/P/. Lukyanov, E.A. Printsipy postroeniya intellektual'noy elektronnoy dokumentatsii stanka. [Principles of intelligent electronic machine documentation.] STIN, 2012, no. 7, pp. 15 (in Russian).

10. Tugengold, A.K., Tishin, A.S., Lysenko, A.F. K voprosu formirovaniya sistemy znaniy pri intellektual'nom elektronnom dokumentirovanii mekhatronnykh ob"ektov. [On knowledge system formation in intelligent electronic documentation of mechatronic objects.] Vestnik of DSTU, 2012, no. 3, pp. 30–36 (in Russian).

11. Tugengold, A.K. Smart-Passport otkrytoy mekhatronnoy tekhnologicheskoy sistemy. [Smart-Passport of an open mechatronic process system.] Intellektual'naya elektronnaya dokumentatsiya. 2013, p. 83 (in Russian).

12. Tugengold, A.K. Otsenka situatsii i prinyatie resheniy intellektual'noy sistemoy upravleniya tekhnologicheskim ob"ektom. [Intellectual control system of the technological object: situation assessment and decision-making] Vestnik of DSTU, 2010, vol. 10, no. 6, pp. 860–867 (in Russian).

13. Pospelov, D.A. Situatsionnoe upravlenie: teoriya i praktika. [Situational management: theory and practice.] Moscow: Nauka, 1986, 228 p. (in Russian).

14. Tugengold, A.K., Izyumov, A.I. Printsipy kontseptual'nogo podkhoda k sozdaniyu podsistemy "INSTRUMENT" v smart-pasporte mnogooperatsionnogo stanka. [The principles of the conceptual approach to create a «tool» subsystem for multioperational machine smart-passport.] Vestnik of DSTU, 2014, vol. 14, no. 2, pp. 74–83 (in Russian).

15. Tugengold, A.K, Shuchev, K.G., Izyumov, A.I., Terekhov, D.Y. Otsenka nechetkoy granitsy stoykosti instrumenta mnogooperatsionnogo stanka. [The estimation of fuzzy boundary of multioperational machine tool life.] Vestnik of DSTU, 2015, no. 2(81), pp. 33–41 (in Russian).

16. Tugengold, A.K., Lukyanov, E.A. Intellektual'nye funktsii i upravlenie avtonomnymi tekhnologicheskimi mekhatronnymi ob"ektami. [Intelligent functions and management of autonomous process mechatronic facilities.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2013 203 p. (in Russian).

17. Kravchenko, V.M., Sidorov, V.A., Sedush, V.Y. Intellektual'nye funktsii i upravlenie avtonomnymi tekhnologicheskimi mekhatronnymi ob"ektami. [Technical diagnosis of mechanical equipment.] Donetsk: Yugo-Vostok Ltd, 2009, 459 p. (in Russian).

18. Dimitrov, V.P., Borisova, L.V., Nurutdinova, I.N. Metodika otsenki soglasovannosti modeley nechetkikh ekspertnykh znaniy. [Methods for estimating coordination of fuzzy expert knowledge models.] Vestnik of DSTU, 2010, no. 2 (45), pp. 205–216 (in Russian).

Поступила в редакцию 25.09.2015
Сдана в редакцию 25.09.2015
Запланирована в номер 22.01.2016

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК. 62-83: 621.313.33:519.87 DOI 10.12737/18266

Моделирование режима торможения асинхронного двигателя частотного электропривода с использованием гармоник тока статора*

Н. Ф. Карнаухов[1], М. Н. Филимонов[2], Д. А. Статовой[3], Ф. В. Бонилья[4]**
[1,2,3,4] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Braking mode simulation of induction motor of variable-frequency drive using stator current harmonics***

N. F. Karnaukhov[1], M. N. Filimonov[2], D. A. Statovoy[3], P. Bonilla[4]
[1,2,3,4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью данной работы является исследование электродинамических процессов в частотно-управляемом электроприводе (ЧУЭП) методом математического моделирования — в частности, в режиме двухтокового динамического торможения с учетом 5-й и 7-й гармоник тока статора асинхронного двигателя (АД). Приведены особенности формирования автономным инвертором напряжения (АИН) низких частот (0,2–15 Гц) тока статора АД, сопровождаемого дополнительными потерями электроэнергии в ЧУЭП и появлением пульсирующих моментов на валу АД, вызывающих неравномерность движения исполнительного механизма (ИМ) рабочего органа (РО) технологической машины (ТМ) в зоне малой скорости и усложняющих их позиционирование в заданное положение. При неоднозначности сил трения в звеньях подвижности ИМ РО и наличии пульсирующих моментов на валу АД реализовать программное торможение ЧУЭП без коррекции закона движения достаточно трудно. Для решения этой проблемы в ЧУЭП авторы предлагают, во-первых, использовать пространственно-векторную широтно-импульсную модуляцию (ПВ ШИМ) с m-кратной подмодуляцией несущей частоты (НЧ) и без подмодуляции в режиме торможения АД. Во-вторых, целесообразно применить (кратковременно в зоне малой скорости) принцип вибрационной линеаризации для снижения коэффициента трения К до пониженного значения (Кэф) в звеньях подвижности ИМ РО за счет микровибрации ротора АД, обусловленной 5-й и 7-й гармониками тока статора. Таким образом, работа по моделированию ЧУЭП (в программном пакете Matlab + Simulink) позволила уточнить влияние 5-й и 7-й гармоник тока статора АД на возможность программного осуществления двухтокового режима динамического торможения ЧУЭП при снижении общих потерь электроэнергии в зоне малой скорости движения ИМ РО. Кроме того, была подтверждена возможность применения в типовых схемах АИН — АД предлагаемых решений электроприводов мехатронных и робототехнических систем широкого назначения с повышенными требованиями к позиционированию.

Ключевые слова: инвертор напряжения, пространственно-векторная широтно-импульсная модуляция (ПВ ШИМ), гармоники тока статора, пульсирующий (колебательный) момент, двухтоковое динамическое торможение, подмодуляция несущей частоты, электрические и тепловые потери, вибрационная линеаризация, позиционирование.

The work objective is to study electrodynamic processes in the frequency-controlled drive (FCD) by the mathematical modeling method, in particular, in the two-current mode of the dynamic braking considering the 5th and 7th current harmonics of the induction motor (IM) stator. The features of forming IM stator current low frequencies (0.2-15 Hz) by the autonomous voltage inverter (AVI) followed by the additional electricity loss in the FCD, and the appearance of torque ripple on the IM shaft causing jerkiness of the actuating mechanism (AM) of the production machine (PM) executive device (ED) in the low speed zone and complicating their locating in the prearranged position, are given. It is hard to implement the FCD scheduled deceleration without trajectory correction at the friction forces ambiguity in the ED AM mobility links and availability of the torque ripple on the IM shaft. To solve this problem, the authors offer, first, to use a spatial-vector pulse-width modulation (SV PWM) with m-fold submodulation of the carrier frequency (CF) and without submodulation in the IM braking mode. Secondly, it is reasonable to apply (momentarily in a low speed area) the principle of linearization by oscillation to reduce the K friction coefficient to a decreased value in the ED AM mobility links by the IM rotor microvibration due to the 5th and 7th harmonics of the stator current. Thus, the work on modeling FCD (in Matlab + Simulink software package) allows more accurately define the impact of the 5th and 7th harmonics of the IM stator current on the capability of the software implementation of the two-current mode of the FCD dynamic braking while reducing the total energy loss in the ED AM low-speed motion area. In addition, the applicability of the proposed solutions of the electric drives of mechatronic and robotic multipurpose systems with higher requirements for positioning in the basic AM – AVI circuits is confirmed.

Keywords: voltage inverter, spatial-vector pulse-width modulation (SV PWM), stator current harmonics, torque ripple, two-current dynamic deceleration, submodulation of carrier frequency, electrical and heat losses, linearization by oscillation, positioning.

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: nika811@bk.ru, maxfil2006@yandex.ru, dr-monro@mail.ru, tiranoruso@gmail.com
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

Введение. В производственной практике — например, в промышленных роботах (ПР), манипуляторах, металлорежущих станках — могли бы более широко применяться частотно-управляемые электроприводы (ЧУЭП) на базе короткозамкнутого асинхронного двигателя (АД), функционирующие по схемотехническому решению [1]: автономный инвертор напряжения — асинхронный двигатель (АИН — АД). Однако в настоящее время использование ЧУЭП несколько ограничено рядом причин [1, 2, 3]. В частности, невозможно обеспечить необходимые механические характеристики АД в зоне низких и ползучих скоростей с учетом сил трения в направляющих движения исполнительного механизма (ИМ) рабочего органа (РО) технологической машины (ТМ). Известна [4] неоднозначность движущих сил ИМ, обусловленная пульсациями результирующего момента на валу АД при квазисинусоидальном питающем напряжении статора низкой частоты 0,2–15 Гц. Это ведет к формированию шагового режима вращения ротора, что объясняется следующим образом. Множество магнитных полей в статоре АД возбуждаются от гармоник тока — в основном, за счет взаимодействия полей 5-й и 7-й гармоник с основной гармоникой — и вращаются с различными скоростями и в различных направлениях [2]. Если рассматривать случайный характер изменения сил трения в звеньях подвижности ТМ в совокупности с формированием пульсирующего момента на валу АД, то представляется довольно сложным обеспечение заданного режима программного торможения АД.

Данная статья посвящена проблеме снижения влияния трения в звеньях подвижности на точность позиционирования ИМ ТМ за счет кратковременного использования результирующего (пульсирующего) момента полей 5-й и 7-й гармоник тока статора с основной гармоникой в режиме предоконечного торможения АД мощностью до 100 Вт. Принято, что структура ИМ промышленных роботов станочных систем является сложной, и в ней наибольшая интенсивность микродвижений звеньев наблюдается на частотах собственных колебаний $f_{им}$, изменяющихся от 3 до 50 Гц [5]. По мнению авторов, данная задача может быть решена следующим образом. На конечной стадии режима торможения АД (например, транспортирующей степени подвижности с электроприводом в системе АИН — АД) предлагается формирование пульсирующего момента, изменяющее «эффективный» коэффициент трения звена подвижности ИМ в результате применения принципа «вибрационной линеаризации» коэффициента трения [7].

Цели исследования

— Оценка влияния 5-й и 7-й гармоник тока статора частотно-управляемого АД на формирование колебательного момента на валу АД. Поиск (методом математического моделирования) условий обеспечения линейности перемещения ИМ РО ТМ в области низких частот вращения вала АД.

— Разработка метода (способа) регулирования момента трения в звеньях ИМ привода ТМ посредством формирования и управления амплитудами 5-й и 7-й гармоник тока обмоток статора. Это позволит использовать эффект вибрационной линеаризации вращения ротора АД для снижения влияния сил трения и улучшения качества позиционирования ИМ при работе ЧУЭП в зоне малой скорости.

Решение задачи. Для решения указанной проблемы представляется целесообразным следующее.

— Использовать АИН с пространственно-векторной широтно-импульсной модуляцией (ПВШИМ) и со ступенчато-программно-перенастраиваемым уровнем несущей [1, 3]. Изменение алгоритма работы ключей АИН (введение подмодуляции несущей частоты — НЧ) может обеспечить управляемое формирование выходного напряжения АИН повышенной электромагнитной совместимости с коэффициентом несинусоидальности, не превышающим 5 % (ГОСТ 13109-97) [2, 3].

— Ввести режим подмодуляции НЧ (16–50 кГц). В этом случае можно будет регулировать амплитуду гармонических составляющих напряжения АД и применить принцип вибрационной линеаризации коэффициента трения в звеньях подвижности ИМ. Это важно для повышения равномерности вращения вала АД, движения ИМ в режиме программного торможения и позиционирования РО [7, 5].

Известно [2], что работа ТМ в повторно-кратковременном режиме сопровождается значительными изменениями скоростей движения ИМ РО. Это связано с предельно-допустимыми моментами исполнительного двигателя и увеличением тепловых потерь. При низких значениях моментов наблюдается увеличение переходных процессов, сопровождаемое снижением быстродействия и производительности ТМ. Поэтому выбор продолжительности пуска и торможения АД ТМ в каждом конкретном случае требует детального исследования. Режим должен формироваться в зависимости от вида нагрузки: регулярная, нерегулярная, изменяющаяся с некоторой кратностью статического момента или зависящая от формы графика (двухпериодного или трехпериодного) скоростей [6].

Для исследования пускотормозных режимов АД при частотном управлении математическая модель последнего может быть основана на дифференциальных уравнениях обобщенной электрической машины и представлена в двухкоординатной системе α и β [1, 4]:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} i'_{1\alpha} \\ i'_{2\alpha} \\ i'_{1\beta} \\ i'_{2\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -cr_1 & dr'_2 & \Omega dL_{12} & \Omega dL_2 \\ dr_1 & -br'_2 & -\Omega bL_{12} & -\Omega bL_2 \\ -\Omega dL_{12} & -\Omega dL_2 & -cr_1 & dr'_2 \\ \Omega bL_{12} & \Omega bL_2 & dr_1 & -br'_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} i_{1\alpha} \\ i_{2\alpha} \\ i_{1\beta} \\ i_{2\beta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} c & 0 \\ -d & 0 \\ 0 & c \\ 0 & -d \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} u_{1\alpha} \\ u_{2\beta} \end{bmatrix}, \\ J \cdot \Omega' = \frac{3}{2} \cdot p \cdot L_{12} \cdot (i_{1\beta} i_{2\alpha} - i_{1\alpha} i_{2\beta}) - M_{\text{н}}(\Omega), \quad = \int_0^{t_1} \Omega dt, \end{cases} \tag{1}$$

где $u_{1\alpha} = U_H \cdot \gamma \cdot \cos(\alpha \cdot t)$; $u_{2\beta} = U_H \cdot \gamma \cdot \sin(\alpha \cdot t)$; $L_1 = L_{12} + L_{\sigma 1}$; $L_2 = L_{12} + L_{\sigma 2}$; $b = \frac{L_1}{L_1 L_2 - L_{12}^2}$; $c = \frac{L_2}{L_1 L_2 - L_{12}^2}$; $d = \frac{L_{12}}{L_1 L_2 - L_{12}^2}$.

В системе уравнений (1): $i_{1\alpha}$, $i_{2\alpha}$, $i_{1\beta}$, $i_{2\beta}$ — токи в обмотках статора и ротора по неподвижным относительно статора координатным осям α и β; $u_{1\alpha}$, $u_{1\beta}$ — напряжения на обмотках статора по осям α и β; r_1, r'_2 — активные сопротивления ротора и статора соответственно; L_1, L_2, L_{12} — индуктивности статора и ротора и взаимная индуктивность; $L_{\sigma 1}$, $L_{\sigma 2}$ — индуктивности рассеяния обмоток статора и ротора; p — число пар полюсов статора АД; U_H, γ, α — номинальное относительное входное напряжение питания АД, частота входного напряжения питания; Ω — угловая частота вращения ротора АД; $M_н(\Omega)$ — момент нагрузки на роторе АД; J — момент инерции ротора АД; φ — угол поворота ротора.

В системе Mathcad была исследована приведенная в [8] математическая модель АД АИР-50. Ее параметры: Рн = 90 Вт (Ps = 93,75 ВА); $U_{фн}$ =127 В; f_c = 50 Гц; $R_{фс}$ = 37,15 Ом; L_s = 0,102 Гн; R_r = 25,69 Ом; L_r = 0,102 Гн; взаимная L_{sr} = 1,69 Гн; μ_r = 0,00025; $J_r = 0{,}2454 \cdot 10^{-4}$ кг · м^2; $2p$ = 1. В результате получены графические зависимости фазных токов (кривые 1, 2, 3 (рис. 1, а) и момента АД (кривая 1, рис. 1, б)) при переключении (t = 0,12 с) IGBT-транзисторов АИН с переходом (переключением) от двенадцати рабочих состояний базовых векторов к двадцати четырем (соответственно, кривые 4, 5, 6 рис. 1, а) и момента (кривая 2, рис. 1, б) при формировании квазисинусоидального напряжения без подмодуляции несущей частоты.

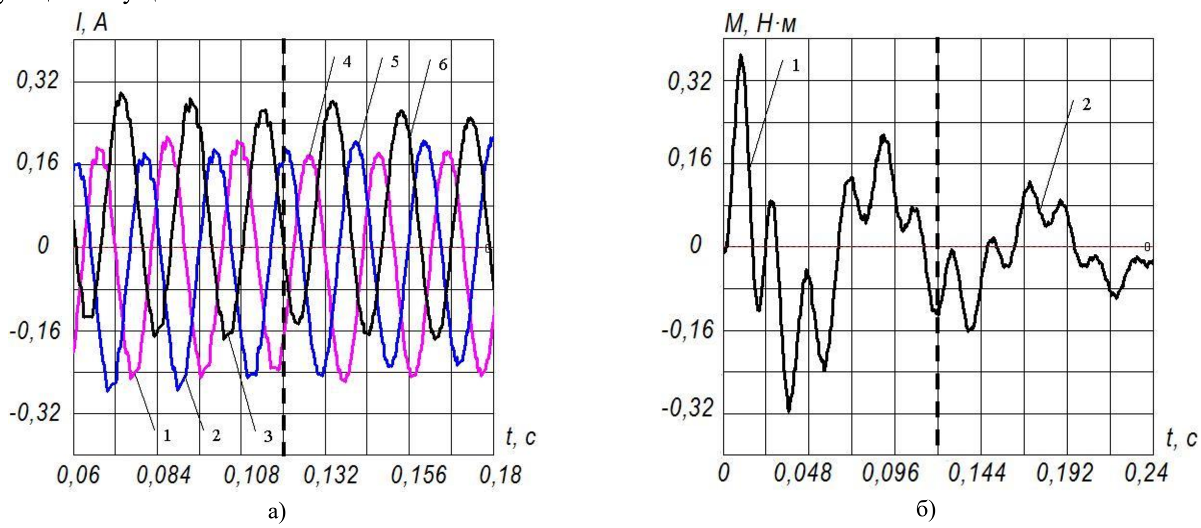


Рис. 1. Фазные токи и момент на валу АД без подмодуляции НЧ

Анализ зависимостей показывает, что кривые 1, 2, 3 фазных токов статора АД при 12 базовых векторах (рис. 1, а) имеют видимые искажения (выбросы) амплитуд, значения которых на 13,6 % превышают уровни амплитуд фазных токов (кривые 4, 5, 6), формируемых при 24 базовых векторах. При тех же условиях генерирования фазных токов в зависимостях создаваемого момента на валу АД гармоническими составляющими (кривые 1 и 2, рис. 1, б) имеет место уменьшение амплитуд выбросов до 46 %.

На рис. 2 приведены зависимости тех же переходов рабочих состояний АИН (с 12 на 24 базовых вектора) в режиме двукратной подмодуляции НЧ, т. е. m = 2.

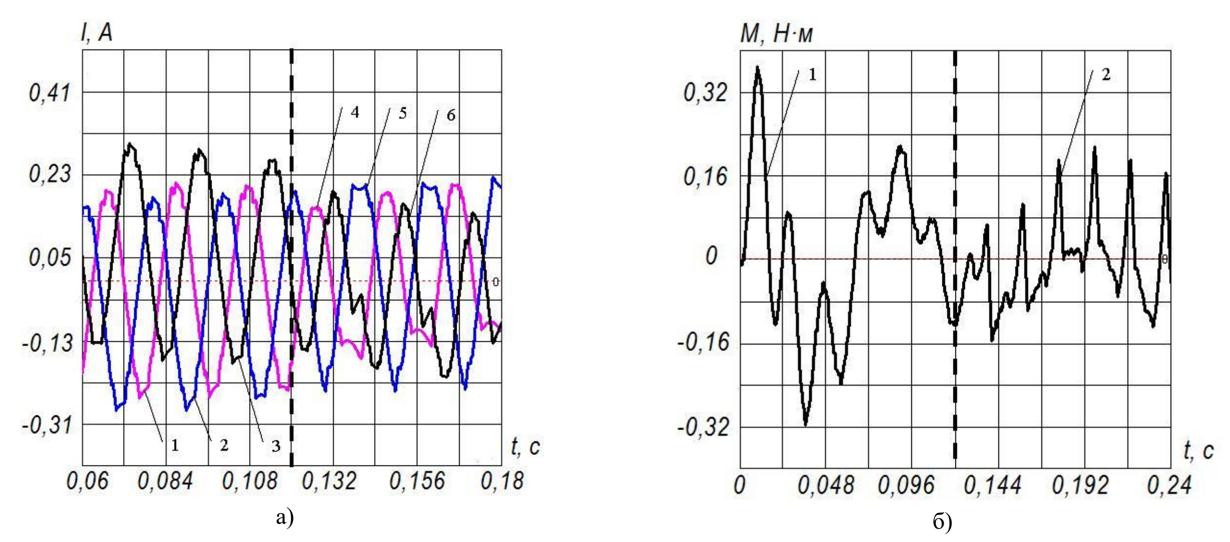


Рис. 2. Фазные токи и моменты на валу АД с двукратной подмодуляцией

Сопоставление амплитуд токов фаз А, В (кривые 1 и 4, 3 и 6, рис. 2, а) подтверждает уменьшение выбросов (от 37 % до 12 %). Это значительно изменяет характер формируемой зависимости момента на валу АД (кривые 1 и 2, рис. 2, б) при снижении всплесков амплитуд момента от 47 % до 23 %. Появление учащенных всплесков уменьшенных амплитуд на зависимости формируемого момента (за время $\Delta t = 0{,}24 - 0{,}12 = 0{,}12$ с) позволяет повысить равномерность вращения вала АД, плавность перемещения ИМ в зоне позиционирования. Применение 2-3-кратной и выше подмодуляции НЧ АИН в IGBT-транзисторах сопровождается дополнительными тепловыми потерями. Их можно снизить, изменив алгоритм работы IGBT-транзисторов. При этом по сигналам датчиков учитывается малое время нахождения ИМ РО ТМ в зоне позиционирования.

В программном пакете Matlab + Simulink была разработана обобщенная модель ЧУЭП [9] для:

— учета пульсирующих моментов;

— оценки влияния сил трения на формирование скорости АД;

— выявления особенностей управления движением ИМ в зоне позиционирования (рис. 3).

Рис. 3. Схема моделирования режима торможения АД в системе АИН — АД

Модель содержит следующие блоки.

Asynchronous machine — асинхронный двигатель (АД) переменного тока с короткозамкнутым ротором, описываемый системой уравнений (1).

Bridge — трехфазный мостовой выпрямитель на диодах с тормозным резистором R и ключом Breaker для управления режимом динамического торможения АД.

Three-Phase Voltage Source — генератор трехфазного напряжения для питания АД.

Three-Phase Breaker — трехфазный выключатель для отключения/подключения питающего трехфазного напряжения к АД, формируемого блоком Three-Phase Voltage Source.

DC Voltage Source — источник постоянного напряжения для формирования постоянного тока в обмотке статора АД в режиме двухтокового динамического торможения.

Breaker1 и Breaker2 — ключи для управления режимом двухтокового динамического торможения АД.

Step1 — блок, формирующий сигнал управления ключом Breaker блока Bridge.

Three-Phase Voltage Source1 — генератор трехфазного напряжения для формирования дополнительного напряжения питания АД 5-й или 7-й гармоникой.

Three-Phase Breaker1 — трехфазный выключатель для отключения/подключения к АД трехфазного напряжения 5-й или 7-й гармоники, формируемых блоком Three-Phase Voltage Source1.

Vab, Vbc и Vac — блоки для измерения фазных напряжений на обмотках статора АД.

Measurements — блок для измерения и формирования следующих переменных, описывающих состояние АД:

— Rotor speed — угловая скорость вращения ротора, рад/с;

— Stator current is_a — ток фазы A статора, Ампер;

— Stator current is_b — ток фазы B статора, Ампер;

— Stator current is_c — ток фазы C статора, Ампер;

— Electromagnetic torque Te — электромагнитный момент ротора, Н·м;

— Rotor current iq — проекция тока ротора на ось α, Ампер;

— Rotor current id — проекция тока ротора на ось β, Ампер;

— Stator current is_q — проекция тока статора на ось α, Ампер;

— Stator current is_d — проекция тока статора на ось β, Ампер.

Losses-блок предназначен для измерения суммарных электрических (тепловых) потерь мощности и энергии в обмотках статора и ротора АД, расчет которых осуществляется в соответствии с выражениями [1, 10, 11]:

$$P_Э = \left(i_{1\alpha}^2 + i_{1\beta}^2\right)\cdot r_1 + \left(i_{2\alpha}^2 + i_{2\beta}^2\right)\cdot r_2'; \;\; Q_Э = \int_0^{t_1} P_Э dt. \tag{2}$$

Здесь $P_Э$ — суммарные электрические (тепловые) потери мощности; $Q_Э$ — суммарные потери энергии в обмотках статора и ротора АД.

Integrator1 — блок для формирования сигнала Rotor Angle (угол поворота ротора АД, рад) путем интегрирования угловой скорости вращения ротора.

Load + vibration-блок — S-функция для формирования момента нагрузки на роторе АД в функции угловой скорости вращения ротора.

При этом момент сопротивления на роторе АД задается в виде уравнения, например, «вентиляторной» нагрузки с дополнением пульсирующей составляющей момента в режиме торможения согласно системе уравнений:

$$M(\Omega) = \begin{cases} M_c + k\cdot\Omega^2, \;\; при \;\; 0 \le t \le t_1; \\ M_c + k\cdot\Omega^2 + M_{c1}\cdot\sin(\Omega_1 t), \;\; при \;\; t > t_1. \end{cases} \tag{3}$$

Здесь M_c — статическая часть момента нагрузки на роторе АД, k — коэффициент трения; M_{c1} — амплитуда пульсирующего момента сопротивления, обусловленного микровибрацией ротора АД, вызванной наличием высших гармоник в напряжении питания АД в режиме торможения; Ω_1 — частота высшей гармоники напряжения питания АД, создающей пульсирующий момент сопротивления.

Simulink-PS Converter — блок, преобразующий безразмерную математическую величину в размерную физическую величину (математического значения момента сопротивления на роторе АД в физическое значение в Н · м). Ideal Torque Source — блок, формирующий на выходе крутящий момент, пропорциональный значению физического сигнала на его входе.

Solver Configuration — блок, задающий условия для решения уравнений, описывающих модель в Matlab + Simulink.

Clock1 и Clock2 — блоки, формирующие текущее время процесса моделирования.

To Workspace, To Workspace 1, To Workspace 2, To Workspace 3 — блоки, передающие в систему Matlab Workspace рассчитанные в результате моделирования значения угла поворота ротора АД и компонентов тока статора i_{1b}, i_{1c}, i_{1a} соответственно.

Load — блок, задающий начальное значение момента сопротивления ротора АД.

Load1 — блок, задающий режим торможения АД под нагрузкой.

Manual Swith — блок для переключения режимов торможения АД под нагрузкой и на холостом ходу.

Scope 1, Scope 2, Scope 3, Scope 4, Scope 5 — блоки, которые графически отображают осциллограммы сигналов: момента нагрузки ротора АД; фазных напряжений на обмотках статора; угловой скорости вращения ротора; тока фазы a ротора; электромагнитного момента на роторе АД; угла поворота ротора; суммарных электрических (тепловых) потерь энергии и мощности в обмотках статора и ротора АД.

Chart — блок, управляющий работой других блоков модели с учетом сигналов угловой частоты вращения ротора Ω и текущего времени моделирования t, формирует следующие управляющие сигналы:

$$loadControl = \begin{cases} 0, & 0 \le t \le 0{,}5; \\ 1, & 0{,}5 < t \le 1; \\ 2, & t > 1 \text{ и } 0{,}01 \cdot \Omega_H \le \Omega \le 0{,}1 \cdot \Omega_H; \\ 3, & t > 1 \text{ и } \Omega < 0{,}01 \cdot \Omega_H; \end{cases}$$

$$threePScontrol = \begin{cases} 0, & t > 1; \\ 1, & 0 \le t \le 1; \end{cases} \qquad (4)$$

$$dcPScontrol = \begin{cases} 0, & 0 \le t \le 1 \text{ или } t > 1 \text{ и } \Omega < 0{,}01 \cdot \Omega_H; \\ 1, & t > 1 \text{ и } \Omega \ge 0{,}01 \cdot \Omega_H; \end{cases}$$

$$dcSP1 = \begin{cases} 1, & 0 \le t \le 1 \text{ или } t > 1 \text{ и } \Omega < 0{,}01 \cdot \Omega_H; \\ 0, & t > 1 \text{ и } \Omega \ge 0{,}01 \cdot \Omega_H; \end{cases}$$

$$dcPS1 = \begin{cases} 0, & 0 \le t \le 1 \text{ или } t > 1 \text{ и } \Omega < 0{,}01 \cdot \Omega_H \text{ или } t > 1 \text{ и } \Omega > 0{,}1 \cdot \Omega_H; \\ 1, & t > 1 \text{ и } 0{,}01 \cdot \Omega_H \le \Omega \le 0{,}1 \cdot \Omega_H. \end{cases}$$

Диапазоны изменения характерных параметров уравнения (4) выбраны в соответствии с тахограммой $\Omega = f(S)$, приведенной на рис. 4.

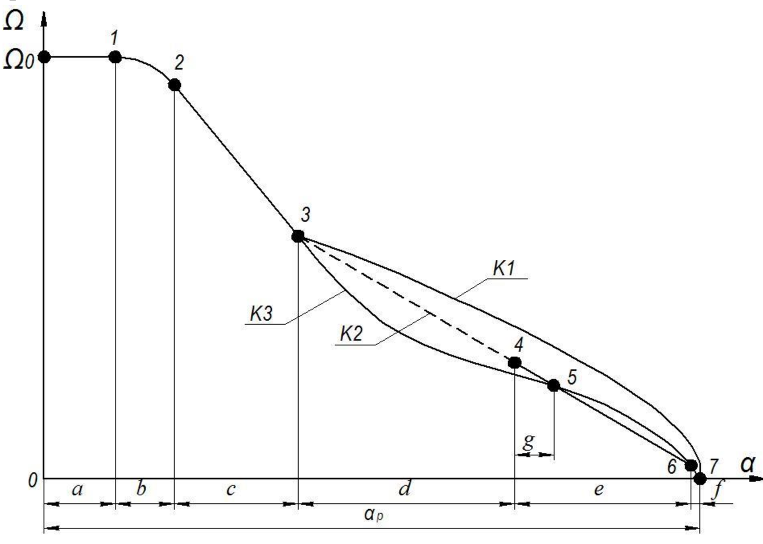


Рис. 4. Тахограмма угловой скорости АД на расчетном участке торможения

В процессе регулирования скорости и положения ИМ используются сигналы обратных связей по регулируемым переменным, обеспечиваемые соответствующими измерительными устройствами с целью управления скоростью ИМ РО в функции пройденного пути.

Для повышения производительности ТМ можно программно исключить промежуточные формирования скорости движения (перемещения) ИМ РО (точки 1, 2, 3 тахограммы, рис. 4). Это связано с возможностями СУ по обеспечению непрерывного изменения скорости АД в режиме, например, программного двухтокового динамического торможения при прохождении ИМ пути (a + b + c). Такой режим торможения АД в совокупности с работой АИН на

базе ПВШИМ позволяет реализовать допустимые ускорения (разгона — торможения) без ударов в кинематике ИМ ЧУЭП ТМ до точек 4, 5, когда такое торможение еще осуществимо [10].

С учетом длины участка (d + e + f), соответствующего точкам 3, 4, 5, 6, 7, (линейная зависимость К 2), скорость торможения можно определить согласно выражению [1, 6, 12]:

$$\Omega_{ДОП} = \sqrt{2M_T \cdot \Delta\alpha / J_П \cdot K_S}\ , \quad (5)$$

где $\Omega_{ДОП}$ — допустимая скорость торможения по условиям прочности конструкции исполнительного механизма, $M_T = M_{Tmax}$ — максимальное значение динамического момента торможения; $J_П$ — момент инерции ИМ ЧУЭП, приведенный к валу АД.

Приращение пути при постоянном тормозном моменте из (5) составит [1, 12]:

$$\Delta\alpha = J_П \cdot \frac{\Omega_0^2 \cdot K_S}{2M_T} = b \cdot \Omega_0^2 . \quad (6)$$

Здесь Ω_0 — начальная скорость торможения, K_S — коэффициент пропорциональности между углом поворота вала двигателя $\varphi_в$ и перемещением (рад/рад, м/рад).

Если принять $J_П$ = const в (5) и (6), то ожидаемое значение $\Delta\alpha$ связано с формированием тормозного момента M_T как параметра, зависимого от изменяющегося значения момента трения в подвижных звеньях ИМ в зоне малой и ползучей скорости движения ИМ.

Известно [6], что тахограмма участка 3–7 движения ИМ существующих станочных систем в указанной зоне скорости может быть реализована по-разному — кривыми К1, К2, К3, зависимыми от инерционной составляющей $J_П$ (кривая К1), от момента трения и скорости в виде экспериментальной кривой К3 или линейной зависимости К2 (для идеального случая).

Неоднозначность момента торможения $M_т$ в зоне 3–4–5–6–7 затрудняет точное определение значения $\Delta\alpha$ по соотношению (6) из-за нестабильности момента трения $M_{тр}$ и сопровождается снижением точности позиционирования ИМ РО.

Для измерения длины участка g (точки 4–5) в СУ ЧУЭП дается оценка фактической скорости движения и положения РО посредством датчиков (инкрементальный энкодер DRS60 фирмы SICK; интерфейс — TTL/RS422; количество импульсов на один оборот — 8192). Это позволяет осуществить в модели программное регулирование амплитуды 7-й гармоники (участок 5–6), а на участке 6–7 — амплитуды 5-й гармоники с целью создания микровибраций ротора АД и получения эффекта вибрационной линеаризации [4] коэффициента трения на малое время в нелинейной механической системе.

Введение дополнительной микровибрации в звене подвижности ИМ от АД позволяет уменьшить значение эффективного коэффициента трения ($k_{эф}<k$) в транспортирующем звене подвижности, что подтверждают теоретические [7] и экспериментальные исследования [13].

При моделировании режимов работы ЧУЭП использовались следующие значения параметров для блоков модели.

1. Asynchronous machine (параметры АИР-50 А2).
2. Код S-функции, реализуемой блоком Load + vibration:

```
function load = setLoad(t,comandLoad,omega,torque)
%#codegen
wn = 315; % Nominalnaya ckorost
tau_set = 20*torque/100; tau_friction = 3*torque/100;
load =0;
if (comandLoad == 1)
 load = torque + tau_friction*omega*omega;
end if(comandLoad == 2)
 load = torque + tau_friction*omega*omega +
 5*tau_set*sin(2*pi*250*t);
 %load = tau_friction*omega*omega;
End if(comandLoad == 3)load = 0; end
```

3. Three-Phase Voltage Source: амплитудное значение напряжения — 179,61 В; фаза напряжения — 0 эл. град; частота напряжения — 50 Гц.
4. Three-Phase Voltage Source: амплитудное значение напряжения — 0,2·24 В для 5-й или 0,13·24 В для 7-й гармоники питающего напряжения; фаза напряжения — 0 эл. град; частота напряжения — 250 Гц (5-я гармоника) или 350 Гц (7-я гармоника).

5. Блок Bridge: R (сопротивление) — 10 Ом.

6. Блок Losses: Rr (активное сопротивление обмотки фазы ротора) — 25,69 Ом.

7. Блок Losses: Rs (активное сопротивление обмотки фазы статора) — 37,15 Ом.

8. Блок Losses: (Math Function 1, 2, 3, 4) function — square (u^2).

9. Блок Load: constant value (–0,0001 Н·м).

10. Блок Step1: step time — 1; initial value — 0; final value — 1; sample time — 0.

11) Блок Load1: constant value (–0,0001 Н·м).

В остальных блоках схемы, изображенной на рис. 3, используются значения параметров по умолчанию. Время моделирования составляет 1,4 с.

На рис. 5 приведены зависимости, полученные при моделировании электромеханических процессов в АД ЧУЭП для режима разгона (временной участок 1, t_1 = 0,05 с) и поддержания скорости (временной участок 2, t_2 = 0,35 с) с моментом нагружения, равным моменту трения звеньев ИМ, принятым равным $M_c = M_m$ = 0,07 Н·м.

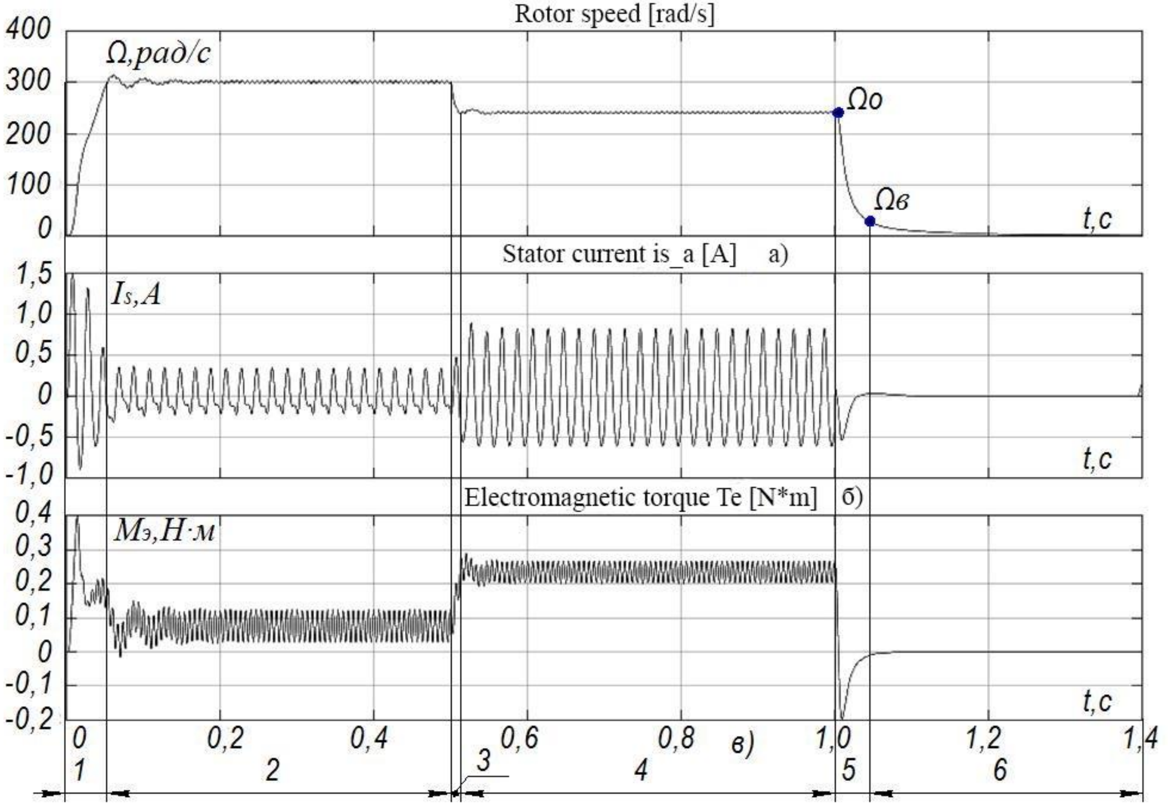


Рис. 5. Угловая частота ротора (а), ток статора (б) и электромагнитный момент АД (в) в функции от времени (с подмодуляцией m = 4)

Пуск АД сопровождается «бросками» формируемых значений:

— максимального тока фазы статора I_{cm} =1,5 А;

— максимального момента двигателя M_m.

При этом частота вращения ротора увеличивается от 0 до Ω_0 = 300 рад/с с перерегулированием σ не более 8 %.

На временном участке 3 (t_3 = 0,02 с) осуществляется наброс статического момента ΔM_c = 0,155 Н·м в соответствии с выражением (3), что вызывает рост тока I_c и просадку частоты вращения вала АД с 300 рад/с до 245 рад/с. Состояние такого режима АД сохраняется на временном интервале 4 (t_4 = 0,48 с).

На участке 5 (t_5 = 0,06 с) с переходом на участок 6 приведены изменения контролируемых параметров АД, когда при t = 1 с моделируется процесс выключения АИН по формированию 3-фазного напряжения питания АД и кривой выбега (при одновременном отключении момента трения) ИМ ТМ.

Математическое моделирование с использованием разработанной модели (рис. 3) позволило уточнить влияние пульсаций электромагнитного момента АД, создаваемого 5-й и 7-й гармониками питающего напряжения, на коэффициент трения в звеньях подвижности ИМ при торможении ЧУЭП для различных значений момента инерции нагрузки, приведенных к ротору АД. Для этого на участке 6 при скорости Wв = $0{,}1 \cdot \Omega_0$ движения ИМ (рис. 5) дополнительным генератором Three-Phase Voltage Source1 формировалось трехфазное напряжение амплитуды и частоты гармоник питания (U_n) АД:

— 5-й — 20 % от U_n, 250 Гц;

— 7-й — 13 % от U_n, 350 Гц.

Измерения угла поворота φ ротора осуществлялись от начального момента времени до полной остановки АД. Далее этот угол сравнивался с углом поворота φ_0, измеряемым при отсутствии в напряжении питания АД 5-й или 7-й гармоник на участке торможения:

$\Delta\varphi = \varphi - \varphi_0$. (7)

Измерения разности углов поворота Δφ проводились при $J_П$ нагрузки ЧУЭП, изменяемых от номинального значения $J_н$ до десятикратного — $10 \cdot J_н$, а также для случая торможения АД в режиме холостого хода и под нагрузкой. Полученные зависимости Δφ в функции от $J_н$ (для случая питания АД напряжением 5-й или 7-й гармоники в режиме торможения под нагрузкой и на холостом ходу) представлены на рис. 6.

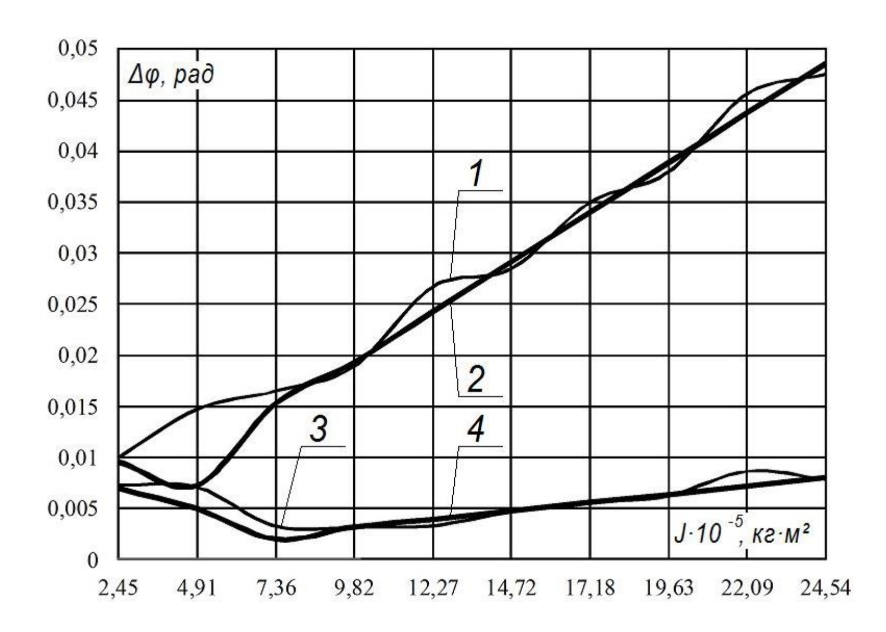


Рис. 6. Зависимости разностей угла поворота ротора АД при изменении гармонических составляющих тока статора

Зависимости пронумерованы соответственно моделируемым режимам работы ЧУЭП:

1 — при торможении без нагрузки (в режиме холостого хода) и пульсирующем электромагнитном моменте, создаваемом 5-й гармоникой;

2 — при торможении с номинальной нагрузкой и пульсирующем электромагнитном моменте, создаваемом 5-й гармоникой;

3 — при торможении без нагрузки (в режиме холостого хода) и пульсирующем электромагнитном моменте, создаваемом 7-й гармоникой;

4 — при торможении с номинальной нагрузкой и пульсирующем электромагнитном моменте, создаваемом 7-й гармоникой.

Анализ зависимостей 1, 2 (рис. 6) показывает, что наличие 5-й гармоники (амплитуда 20 %, ток статора I_c, частота 250 Гц) формирует дополнительный момент на валу АД, обеспечивающий эффект вибрационной линеаризации коэффициента трения в звеньях подвижности ИМ. Это подтверждается увеличением Δφ от 0,01 до 0,047 рад при изменении инерционной составляющей. Зависимости 3, 4 получены при моделировании режимов торможения АД в аналогичных условиях по задаваемым параметрам, но при наличии в токе I_c статора 7-й гармоники (амплитуда 13 %, частота 350 Гц). В этом случае введение дополнительной микровибрации момента на валу не является достаточным по уровню, чтобы обеспечить эффект вибрационной линеаризации коэффициента трения в звеньях подвижности ИМ. Наибольшее изменение параметра Δφ наблюдается в диапазоне от 0,00025 рад до 0,0055 рад в режиме торможения на холостом ходу и уменьшается при номинальной нагрузке (кривая 4).

На рис. 7 приведены зависимости суммарных электрических (тепловых) потерь мощности и энергии в обмотках статора и ротора АД, полученные в соответствии с уравнением (2) при включении измерительного блока Losses и режима подмодуляции выходного напряжения АИН.

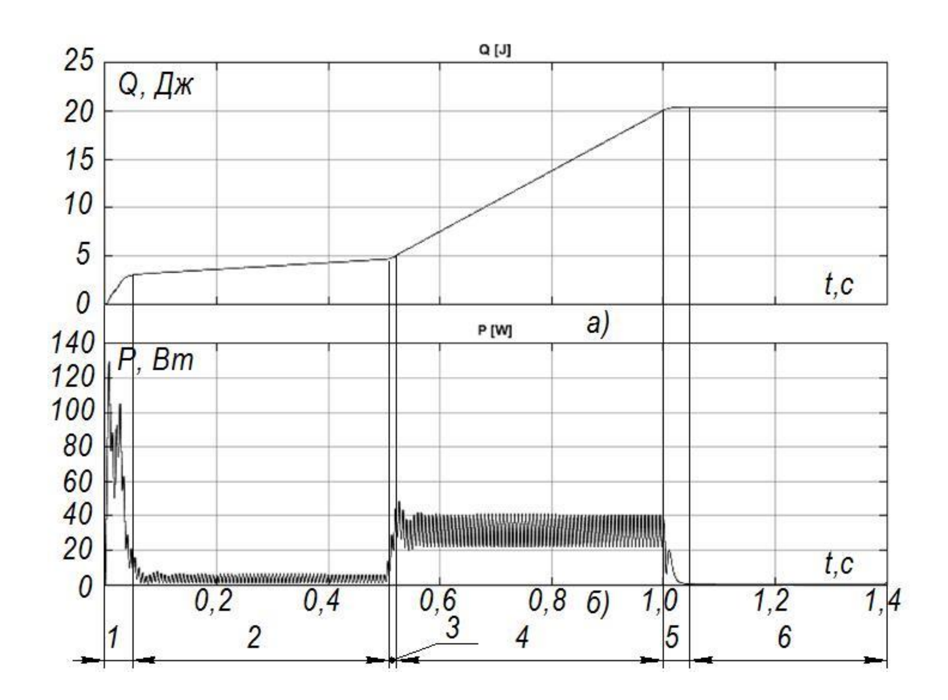


Рис. 7. Суммарные тепловые электрические потери энергии в обмотках статора и ротора АД (а) и суммарные тепловые электрические потери мощности (б) в функции времени (с подмодуляцией m = 4)

Выводы. Анализ полученных в результате моделирования режимов АД ЧУЭП при работе в зоне малой и ползучей скорости перемещения ИМ ТМ позволяет сделать следующие выводы.

1. Случайное влияние сил трения в звеньях подвижности ТМ в зоне малой скорости перемещения ИМ можно уменьшить за счет регулирования амплитуды 5-й гармоники тока статора на стадии предоконечного торможения АД, создавая режим желаемой микровибрации вала АД.

2. Эффект вибрационной линеаризации коэффициента трения в звеньях подвижности ИМ обеспечивается программным управлением АИН с ПВШИМ и ступенчатым изменением несущей частоты в режиме подмодуляции выходного напряжения АИН.

3. Посредством коррекции угла поворота вала АД можно установить программируемый выбег ИМ при торможении АД ЧУЭП и повысить точность позиционирования рабочего органа ТМ.

4. Разработанная модель ЧУЭП в программном пакете Matlab + Simulink позволяет выполнить исследования по оценке суммарных электрических потерь в АД для предполагаемых режимов работы ЧУЭП с учетом и без учета 5-й и 7-й гармоник тока статора.

Библиографический список

1. Соколовский, Г. Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием / Г. Г. Соколовский. — Москва : Академия, 2006. — 273 с.

2. Перельмутер, В. М. Прямое управление моментом и током двигателей переменного тока / В. М. Перельмутер. — Харьков : Основа, 2004. — 210 с.

3. Карнаухов, Н. Ф. Особенности формирования циклических режимов частотного электропривода технологических машин в зоне малой скорости движения исполнительного механизма / Н. Ф. Карнаухов, М. Н. Филимонов, А. И. Изюмов. — Вестник. Дон. гос. техн. ун-та. — 2012. — № 6 (67). — С. 76–86.

4. Филимонов, М. Н. Улучшение динамики торможения асинхронного двигателя станочной системы с частотным управлением / М. Н. Филимонов, Н. Ф. Карнаухов // Современные проблемы машиностроения и высоких технологий : мат-лы. междунар. науч.-техн. конф., посвящ. 75-летию Дон. гос. техн. ун-та. — Ростов-на-Дону, 2005. — Т. 1. — С. 236–242.

5. Добрынин, С. А. Методы автоматизированного исследования вибрации машин / С. А. Добрынин, М. С. Фельдман, Г. И. Фирсов. — Москва : Машиностроение, 1987. — 224 с.

6. Электромеханические системы управления тяжелыми металлорежущими станками / С.В. Демидов [и др.] ; под общ. ред. С. В. Демидова. — Ленинград : Машиностроение, 1986. — 236 с.

7. Пановко, Я. Г. Лекции по основам теории вибрационных машин и технологий / Я. Г. Пановко. — Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2008. — 192 с.

8. Карнаухов, Н. Ф. Улучшение характеристик частотного электропривода технологических машин в зоне малой скорости движения исполнительного механизма / Н. Ф. Карнаухов, Ю. В. Пудова, М. Н. Филимонов // Молодежь. Техника. Космос : тр. IV Общерос. молодеж. науч.-техн. конф. // Вестник БГТУ. 2012. — № 15. — 380 с. — (Библиотека «Военмех»).

9. Браславский, И. Я. Использование приложения Simulink для оценки потребления электроэнергии асинхронным электроприводом / И. Я. Браславский, З. Ш. Ишматов, Ю. В. Плотников // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB : тр. II науч. конф. — Москва, 2004. — Ч. 5 — С. 1387–1394.

10. Карнаухов, Н. Ф. Особенности формирования двухтокового динамического торможения асинхронного двигателя мехатронной системы при частотном управлении / Н. Ф. Карнаухов, М. Н. Филимонов, Н. В. Деркачев // Мехатроника-2008 : мат-лы IV междунар. науч.-практ. студ. коллоквиума. — Новочеркасск, 2008. — С. 17–20.

11. Карнаухов, Н. Ф. Энергетические показатели электропривода при частотном способе управления асинхронным двигателем / Н. Ф. Карнаухов, В. А. Прус, М. Н. Филимонов // Тр. VIII Междунар. науч.-техн. конф. по динамике технологических систем. — Ростов-на-Дону, 2007. — Т. III. — С. 24–30.

12. Система позиционного электропривода с задатчиком положения / П. Х. Коцегуб // Известия вузов. Электромеханика. — 1982. — № 3. — С. 331–337.

13. Установка для демонстрации рекламно-информационного материала и устройство управления перемещением носителя информации : патент 36914 Рос. Федерация : G09F13/00 H02P7/36 H02P7/62 H02P7/74 H02H7/08 / Н. Ф. Карнаухов, М. Н. Филимонов, С. А. Ушаков. — Опубл. 27.03.04. — Бюл. № 9. — 14 с.

References

1. Sokolovskiy, G.G. Elektroprivody peremennogo toka s chastotnym regulirovaniem. [AC drives with frequency regulation.] Moscow: Akademiya, 2006, 273 p. (in Russian).

2. Perelmuter, V.M. Pryamoe upravlenie momentom i tokom dvigateley peremennogo toka. [Direct control of torque and AC motors current.] Kharkov: Osnova, 2004, 210 p. (in Russian).

3. Karnaukhov, N.F., Filimonov, M.N., Izyumov, A.I. Osobennosti formirovaniya tsiklicheskikh rezhimov chastotnogo elektroprivoda tekhnologicheskikh mashin v zone maloy skorosti dvizheniya ispolnitel'nogo mekhanizma. [Generation features of cycle operations for production machine variable-frequency drive in low-velocity zone of actuator.] Vestnik of DSTU, 2012, no. 6 (67), pp. 76–86 (in Russian).

4. Filimonov, M.N., Karnaukhov, N.F. Uluchshenie dinamiki tormozheniya asinkhronnogo dvigatelya stanochnoy sistemy s chastotnym upravleniem. [Improvement of braking dynamics of the machine tool induction motor with frequency control.] Sovremennye problemy mashinostroeniya i vysokikh tekhnologiy : mat-ly. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf., posvyashch. 75-letiyu Don. gos. tekhn. un-ta. [Current problems in Machine Engineering and high technologies: Proc. Int. Sci.-Tech. Conf. devoted to the 75th anniversary of DSTU.] Rostov-on-Don, 2005, vol. 1, pp. 236–242 (in Russian).

5. Dobrynin, S.A., Feldman, M.S., Firsov, G.I. Metody avtomatizirovannogo issledovaniya vibratsii mashin. [Methods of computer-aided study of machine vibration.] Moscow: Mashinostroenie, 1987, 224 p. (in Russian).

6. Demidov, S.V., et al., Demidov, S.V., ed. Elektromekhanicheskie sistemy upravleniya tyazhelymi metallorezhushchimi stankami. [Electromechanical heavy machine tools control systems.] Leningrad: Mashinostroenie, 1986, 236 p. (in Russian).

7. Panovko, Y.G. Lektsii po osnovam teorii vibratsionnykh mashin i tekhnologiy. [Lectures on the theory foundations of vibrating machines and technologies.] Moscow: Bauman MSTU Publ. House, 2008, 192 p. (in Russian).

8. Karnaukhov, N.F., Pudova, Y.V., Filimonov, M.N. Uluchshenie kharakteristik chastotnogo elektroprivoda tekhnologicheskikh mashin v zone maloy skorosti dvizheniya ispolnitel'nogo mekhanizma. [Improving performance of variable-frequency electric drive of production machines in the actuator low speed motion area.] Molodezh'. Tekhnika. Kosmos: tr. IV Obshcheros. molodezh. nauch.-tekhn. konf.[Youth. Engineering. Space: Proc. IV All-Russian Youth Sci.-Tech. Conf. Bulletin of BSTU, 2012, no. 15, 380 p. (in Russian).

9. Braslavskiy, I.Y., Ishmatov, Z.S., Plotnikov, Y.V. Ispol'zovanie prilozheniya Simulink dlya otsenki potrebleniya elektroenergii asinkhronnym elektroprivodom. [Using Simulink application for estimating power consumption by asynchronous drive.] Proektirovanie inzhenernykh i nauchnykh prilozheniy v srede MATLAB: tr. II nauch. konf. [Designing engineering and scientific applications in MATLAB: Proc. II Sci.Conf.] Moscow, 2004, part 5, pp. 1387–1394 (in Russian).

10. Karnaukhov, N.F, Filimonov, M.N., Derkachev, N.V. Osobennosti formirovaniya dvukhtokovogo dinamicheskogo tormozheniya asinkhronnogo dvigatelya mekhatronnoy sistemy pri chastotnom upravlenii. [Features of forming two-current dynamic braking of mechatronic system asynchronous motor with frequency control.] Mekhatronika-2008: mat-ly IV

mezhdunar. nauch.-prakt. stud. kollokviuma. [Mechatronics-2008: Proc. IV Int. Sci.-Pract. Student Colloquium.] Novocherkassk, 2008, pp. 17–20 (in Russian).

11. Karnaukhov, N.F, Prus, V.A., Filimonov, M.N. Energeticheskie pokazateli elektroprivoda pri chastotnom sposobe upravleniya asinkhronnym dvigatelem. [Energy performance of electric drive with frequency control method of induction motor.] Tr. VIII Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. po dinamike tekhnologicheskikh sistem. [Proc. VIII Int. Sci.Eng. Conf. on dynamics of the technological systems.] Rostov-on-Don, 2007, vol. III, pp. 24–30 (in Russian).

12. Kotsegub, P.K. Sistema pozitsionnogo elektroprivoda s zadatchikom polozheniya. [Position electrodrive system with indexing mechanism.] Russian Electromechanics, 1982, no. 3, pp. 331–337 (in Russian).

13. Karnaukhov, N.F., Filimonov, M.N., Ushakov, S.A. Ustanovka dlya demonstratsii reklamno-informatsionnogo materiala i ustroystvo upravleniya peremeshcheniem nositelya informatsii: patent 36914 Ros. Federatsiya: G09F13/00 H02P7/36 H02P7/62 H02P7/74 H02H7/08 / [Demonstrator of marketing material and motion control device for data carrier.] Patent RF no. 36914, 2004 (in Russian).

Поступила в редакцию 14.12.2015
Сдана в редакцию 28.12.2015
Запланирована в номер 22.01.2016

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 544.18, 544.15 DOI 10.12737/18268

Стабилизаторы для функциональных медных наноматериалов триботехнического назначения [*]

Ю. С. Герасина[1], Е. С. Кочергин[2], А. А. Милов [3], Б. С. Лукьянов[4 **]
[1] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2] Воронежский государственный педагогический университет, г. Воронеж, Российская Федерация
[3] Южный научный центр Российской академии наук, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[4] Южный Федеральный университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Stabilizers for functional copper nanomaterials for triboengineering [***]

Yu. S. Gerasina[1], E. S. Kochergin[2], A. A. Milov[3], B. S. Lukyanov[4 **]
[1] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2] Voronezh State Pedagogical University, Voronezh, Russian Federation
[3] Southern Scientific Center of the Russian Academy of Science, Rostov-on-Don, Russian Federation
[4] Southern Federal Univercity, Rostov-on-Don, Russian Federation

При помощи расчетов методом теории функционала плотности систематически исследован процесс образования комплексов азотсодержащих молекул с малыми кластерами меди Cu_n (n=1–7, 13). Показано, что молекулы $R_1N=Y$ ($Y=CR_2R_3$, NR_2, O) перспективны для поиска присадок для кластеров меди, так как являются синтетически доступными, имеют возможность проявлять восстановительные свойства, прочно связываются с атомами меди и не искажают исходную структуру кластера. Используя любой объемный заместитель R, можно блокировать доступ к большой площади поверхности кластера для агрессивных соединений. Комплексы кислорода на поверхности медного кластера существенно уступают в прочности структурам, образованным молекулами $R_1N=Y$ ($Y=CR_2R_3$, NR_2, O). В зависимости от размера кластера сила взаимодействия изменяется синусоидально от минимума к максимуму.

Ключевые слова: поверхность, нанокластер, медь, гибридизация азота, механизм роста, теория функционала плотности, комплексообразование.

The formation of complexes of nitrogenated molecules with a small copper cluster Cu_n (n=1-7, 13) is systematically studied through the calculations by the density functional theory method. It is shown that the molecules of $R_1N=Y$ ($Y=CR_2R_3$, NR_2, O) are promising for searching agents for copper clusters, as they are synthetically-available, can exert reducing properties, are firmly bound to the copper atoms, and do not distort the original cluster structure. Using any bulky substituent R, it is possible to block access to a large surface area of the cluster for aggressive compounds. Oxygen complexes on the surface of the copper cluster drastically fall short of the strength of the structures formed by molecules $R_1N=Y$ ($Y=CR_2R_3$, NR_2, O). Depending on the cluster size, the interaction force varies in a sinusoidal manner from minimum to maximum.

Keywords: surface, nanocluster, copper, hybridization of nitrogen, growth mechanism, density functional theory, complex formation.

Введение. В последнее время большой интерес вызывают исследования структуры и новые области применения кластеров металлов группы меди [1–3]. Нанокластеры этих металлов перспективны как для использования в медицине в качестве маркеров или части молекулярной структуры медицинских препаратов, так и в химической технологии (селективный катализ), оптике, электронике и ряде других областей техники и технологии [4–7]. Примером такого использования является применение наночастиц меди в триботехнике (раздел трибологии, науки о трении и изнашивании). В частности, большой интерес представляет собой использование кластеров меди в качестве присадки к маслам и смазкам для улучшения их триботехнических характеристик [8–10].

Свойства медных кластеров зависят от их размера и структуры, что в значительной мере определяется способами их получения и хранения. Кроме этого, важнейшей проблемой при синтезе является высокая способность нано-

[*] Работа выполнена при финансовой поддержке внутреннего гранта Южного федерального университета № 213.01–2014/005ВГ.
[**] E-mail: ygerasina@gmail.com, ev10011994@gmail.com, aleksei_milov@list.ru, bluk@ipoc.sfedu.ru
[***] The research is done with the financial support from the internal Southern Federal University grant no. 213.01–2014/005ВГ.

кластеров к агрегации и укрупнению, что приводит к необходимости поиска эффективных стабилизаторов. На данный момент существует ряд физических, химических и биологических методов получения металлических наносистем, но наиболее перспективными являются методы с минимальным числом стадий и компонентов [8]. Реакции химического восстановления наиболее перспективны ввиду их простоты, низкой стоимости и универсальности по сравнению с микробиологическими и физическими методами. При этом восстановителями нередко являются органические и неорганические молекулы с активными азотными и кислородными центрами, которые и выступают в качестве стабилизаторов получаемых кластерных структур [11]. Таким образом, использование азотсодержащих соединений в качестве стабилизатора для наночастиц меди является перспективным.

Ранее было доказано [12], что наиболее прочными контактами между поверхностью кластера меди и элементорганическими веществами отличаются соединения с азотным центром — аммиак и амины, при этом сила такого взаимодействия изменяется с размером кластера и при вариации среды. В связи с этим интересно изучить энергетику Cu–N взаимодействия в зависимости от размера кластера меди и электронного строения азотного центра.

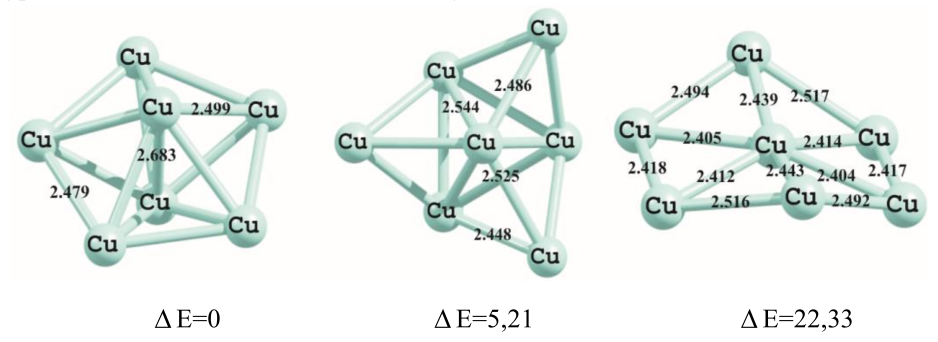
Целью исследования было изучение влияния типичных случаев локализации электронной плотности на азотном центре на контакт с поверхностью кластеров меди в различных апротонных средах (вакуум, углеводород н-гептан, двуатомный спирт-этиленгликоль) в рамках единого подхода.

При этом критериями поиска перспективных стабилизаторов для кластеров меди будем считать синтетическую доступность, возможность модификации заместителей для создания максимальных стерических препятствий к поверхности кластера металла, свойства восстановителя и формирование наиболее прочных связей с медью (максимальная энергия комплексообразования).

Экспериментальная часть. В рамках исследования были рассмотрены кластеры Cu_n (n=1–7, 13). Для исследования влияния электронного строения азотного центра на процесс комплексообразования были использованы: производные аммиака — карбамовая кислота $H_2N–COOH$ и анилин $H_2N–Ph$; молекулы с азотным центром в системе сопряжения — пиррол HNC_4H_4 и пиридин NC_5H_5; структуры азота с двойной связью — $HN=CH_2$ (метанимин), HN=NH (диазен) и HN=O (нитроксил); атомы азота с тройной связью — тиоцианат лития NCS¨Li, цианид лития N≡C¨Li и азот N_2. Для сравнения рассчитаны некоторые комплексы с молекулярным кислородом и водой. Расчеты проводились с полной оптимизацией всех параметров методом теории функционала плотности PBEPBE/Lanl2DZ [13–15] с использованием пакета программ Gaussian–09 [16]. Идентификация стационарных точек осуществлялась путем расчета матрицы силовых постоянных. Все приведенные далее структуры являются минимумами на соответствующих поверхностях потенциальной энергии (ППЭ). Энергия стабилизации комплексов, образованных кластерами металла оценивалась как разность полной энергии комплекса и суммы полных энергий индивидуальных молекул. При наличии нескольких изомеров комплексов в таблицу вносился результат для наиболее стабильной формы. Влияние среды учитывалось в неявном виде — при помощи процедуры SCRF. Для исследования влияния среды выбраны апротонные среды различной полярности — н-гептан и этиленгликоль, а также вакуум.

Обсуждение и результаты. Расчеты методом PBEPBE/Lanl2DZ показывают, что для кластеров Cu_n (n=3–6) наибольшей стабильностью отличаются плоские изомеры, для которых основным структурным мотивом являются треугольные формы. В тоже время кластеры где n>6 стабилизируются лишь в 3D формах. Так, на рис. 1 приведены три изомера Cu_7, соответствующие минимуму на ППЭ и имеющие неплоское строение.

Как показывают расчеты, результаты которых приведены в табл. 1 и на рис. 2, в газовой фазе все производные аммиака (карбамовая кислота и анилин) проигрывают по устойчивости своих комплексов с поверхностью кластеров меди, как воде, так и молекуле кислорода (~21–22ккал/моль). При этом, с ростом размера кластера, энергия стабилизации таких структур изменяется нелинейно, подобно синусоиде.



Δ E=0 Δ E=5,21 Δ E=22,33

Рис. 1. Геометрические характеристики минимумов, полученных при помощи расчетов методом PBEPBE/Lanl2DZ для структуры Cu_7

На рис. 1 все длины приведены в ангстремах, ΔE — энергия относительной устойчивости в ккал/моль. Нулевое значение соответствует самому устойчивому изомеру.

Таблица 1

Энергии стабилизации комплексов, содержащих связь Cu–N, рассчитанные методом PBEPBE/Lanl2DZ (в ккал/моль) в условиях газовой фазы

Молекула	Cu_1	Cu_2	Cu_3	Cu_4	Cu_5	Cu_6	Cu_7	Cu_{13}
H_2N–COOH	7,29	13,54	17,78	17,15				
NH_2	13,76	20,87	16,11	24,80				
N H	12,65	11,96	16,26	15,11				
N	21,37	30,00	36,71	33,74	26,84			
HN=CH_2	24,40	32,08	40,24	36,55	28,66	27,13	27,89	
HN=NH	31,02	33,16	46,05	40,18	31,75	27,28	30,57	36,71
HN=O	46,92	38,04	58,89	48,90	43,37	33,07	39,47	52,28
NCS⋯Li	16,82	32,81	42,65	39,27	31,58			
N≡N	14,25	21,01	27,53	25,23	16,62			
N≡C⋯Li	23,36	33,83	47,06	37,15	31,04			

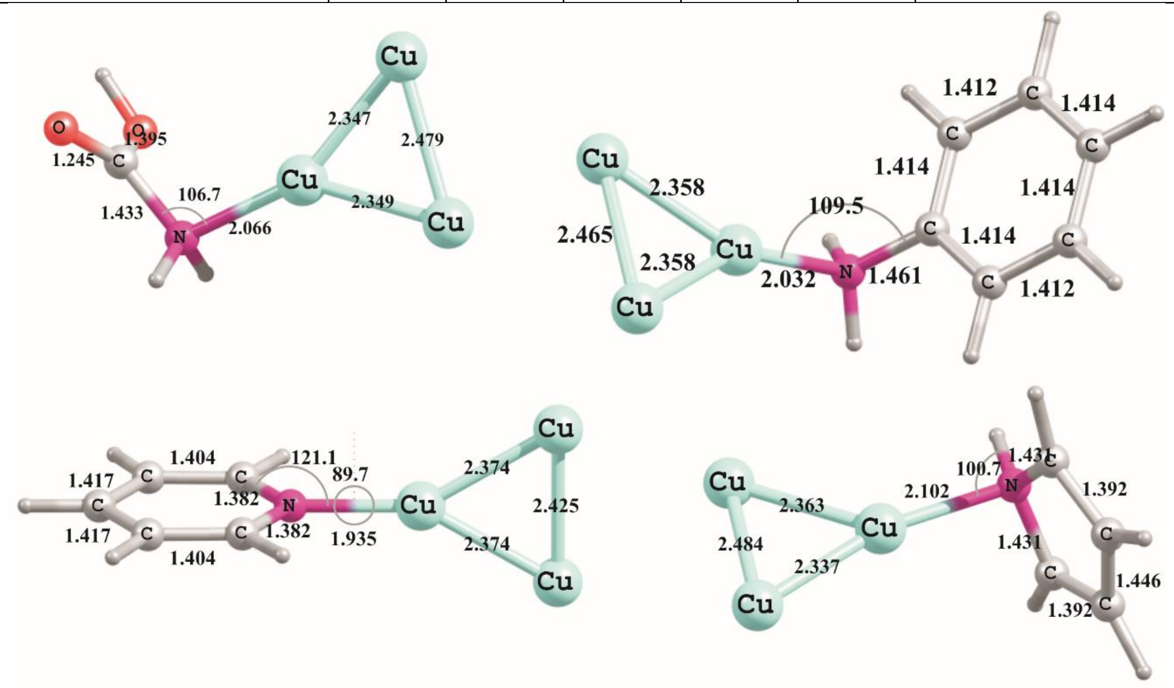


Рис. 2. Геометрические характеристики минимумов, полученных при помощи расчетов методом PBEPBE/Lanl2DZ для комплексов карбамовой кислоты, анилина, пиридина и пиррола с кластером Cu_3

Переход к молекулам пиррола и пиридина, в которых атом азота включен в цепь сопряжения, повышает устойчивость получающихся комплексов с Cu–N-взаимодействием. Так, молекула пиридина связывается с поверхностью медного кластера прочнее, чем молекулы воды или кислорода, и вполне может препятствовать их контакту с металлом, учитывая же существенный размер молекулы пиридина (радиус онзагеровской сферы для нее составляет 3,68Å), ее локализация на одном атоме меди защищает еще несколько ближайших атомов кластера.

Наиболее стабильные комплексы на поверхности медного кластера дают молекулы, в которых азотный центр связан двойной связью с гетероатомом, при этом сила взаимодействия «кластер — молекула» растет с увеличением электроотрицательности заместителя в ряду $HN{=}CH_2 < HN{=}NH < HN{=}O$. Некоторые из этих комплексов изображены на рис. 3. Следует отметить, что стабильность образованных структур значительно превышает силу контакта с поверхностью меди молекул кислорода или воды (на ~10–20 ккал/моль). Как и в случае молекулы пиридина, энергия контакта Cu–N изменяется нелинейно, возрастая до максимума в случае кластера Cu_3 и далее уменьшаясь до минимума в случае комплексов с кластером Cu_6. Следующая зона роста энергии Cu–N-взаимодействия начинается с семиатомного кластера меди (n=7). Для икосаэра Cu_{13} энергия Cu–N взаимодействия сопоставима по величине с таковой для трехатомных кластеров меди, при этом координация с поверхностью медного кластера идет исключительно по азотному центру молекулы, без участия неподеленных электронных пар заместителей.

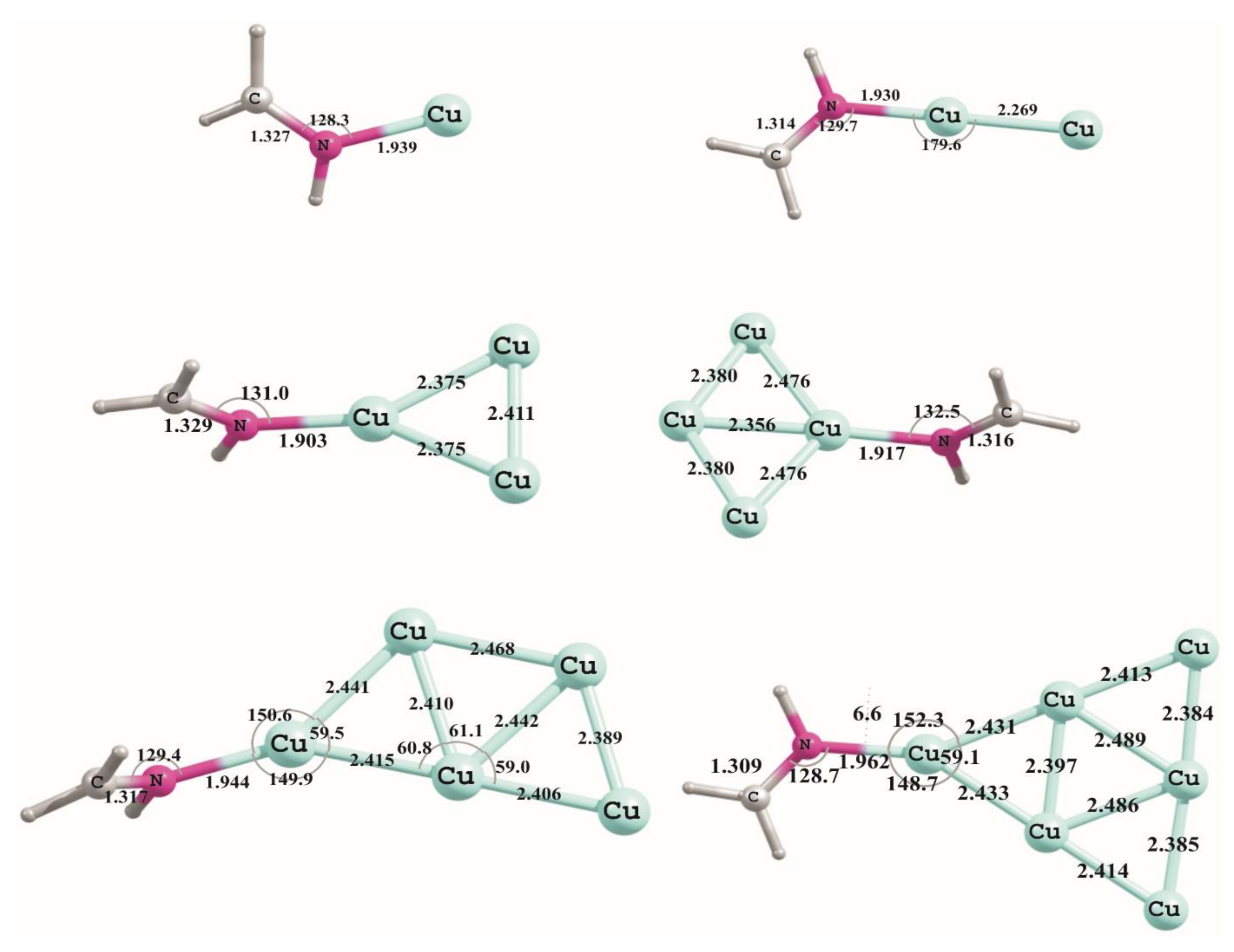


Рис. 3. Геометрические характеристики минимумов, полученных при помощи расчетов методом PBEPBE/Lanl2DZ для комплексов метанимина с кластерами Cu_n (n=1···6)

Органические молекулы, в которых азот связан тройной связью, занимают промежуточное положение по силе стабилизации их комплексов с кластерами меди, при этом структуры $Cu_n \cdots N_2$ с атмосферным азотом по всем пунктам проигрывает комплексам $Cu_n \cdots O_2$, а токсичные соли цианида и тиоцианата лития показывают результаты близкие к ранее рассмотренным молекулам HN=Y (Y=CH_2, NH, O), но более низкие по энергетике. Некоторые такого рода структуры приведены на рис. 4. Недостатком таких систем является их токсичность и возможность модификации только за счет противоиона, что дает немного вариантов, мало различающихся между собой.

Таким образом молекулы, в которых азот связан двойной связью с кислородом в условиях газовой фазы, являются перспективными структурными мотивами сложных молекулярных стабилизаторов кластеров меди, при этом токсичность молекул, полученных на их основе, будет достаточно низкой.

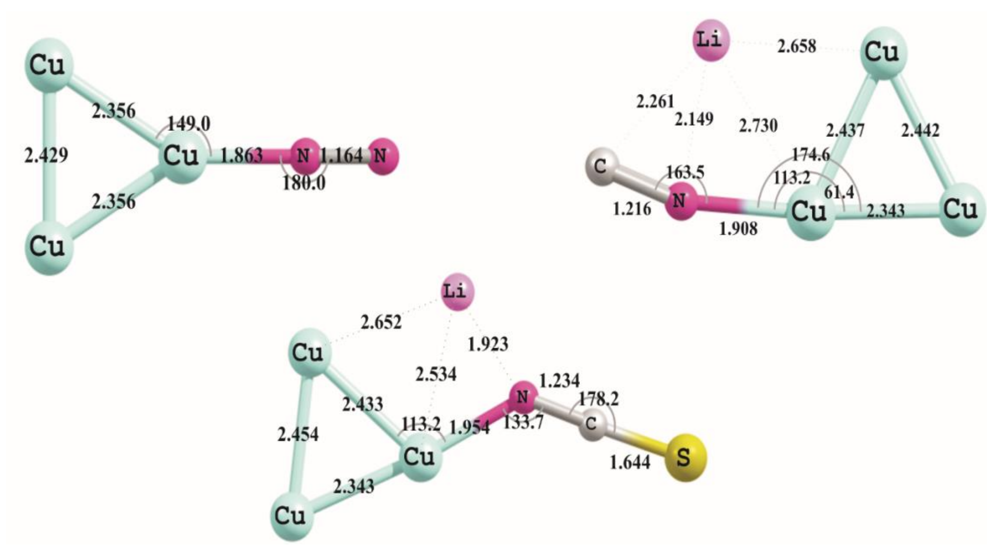


Рис. 4. Геометрические характеристики минимумов, полученных при помощи расчетов методом PBEPBE/Lanl2DZ для комплексов азота, цианида и тиоцианата лития с кластером Cu_3

Переход к неполярной среде n–гептана ослабляет все Cu–N-взаимодействия (табл. 2), но ослабление по-разному зависит как от размера кластера, так и от природы азотсодержащей молекулы. При этом все обнаруженные ранее тенденции сохраняются и наибольшей стабильностью отличаются структуры, где азотный центр связан двойной связью с гетероатомом, при этом максимальную эффективность по-прежнему показывает молекула нитроксила HN=O. Хотя молекулы диазена HN=NH и метанимина HN=CH_2 ощутимо проигрывают ей в качестве молекулы-стабилизатора в уловиях среды предельных углеводородов, они также являются перспективными моделями для поисков присадок за счет большего количества центров для замещения. В условиях неполярной среды соли цианида лития и тиоцианата лития заметно ухудшают свои свойства по сравнению с молекулами HN=Y (Y=CH_2, NH, O).

Таблица 2

Энергии стабилизации комплексов, содержащих связь Cu–N, рассчитанные методом PBEPBE/Lanl2DZ (в ккал/моль) в неполярной системе (н-гептан)

Молекула	Cu_1	Cu_2	Cu_3	Cu_4	Cu_5	Cu_6
H_2N-COOH	7,33	13,70	17,63	16,13		
NH_2	13,97	21,33	25,92	23,93		
N H	12,43	11,75	15,55	13,61		
N	19,64	29,88	35,54	32,35		
HN=CH_2	17,42	33,27	37,79	35,41	29,16	24,45
HN=NH	28,82	30,39	43,31	36,48	32,04	24,57
HN=O	46,85	35,52	58,35	46,30	45,05	
NCS¨Li	10,92	25,23	33,81	30,39		
N_2	14,43	20,71	27,03	24,06		
N≡C¨Li	17,42	33,27	37,79	35,41	31,34	29,69

Изменение среды на полярную апротонную среду двуатомного спирта (этиленгликоль) приводит к усилению всех Cu–N-взаимодействий на поверхности медных кластеров с сохранением всех обнаруженных ранее закономерностей и тенденций как по сравнению с газовой фазой, так и по сравнению со средой предельного углеводорода. Все соответствующие результаты приведены в табл. 3.

Как показывают расчеты, в полярной среде многоатомных спиртов производные аммиака (карбамовая кислота и анилин) существенно проигрывают в силе образованных ими Cu–N-комплексов азотсодержащим молекулами с эффектами сопряжения (пиридин, пиррол) и молекулам с тройными связями (тиоцианаты и цианиды щелочных металлов). При этом наиболее прочные связи по-прежнему регистрируются для молекул с двойными связями, с безусловным лидером — молекулой нитроксила NH=O.

Таблица 3

Энергии стабилизации комплексов, содержащих связь Cu-N, рассчитанные методом PBEPBE/Lanl2DZ (в ккал/моль) в полярной апротонной системе (этиленгликоль)

Молекула	Cu_1	Cu_2	Cu_3	Cu_4	Cu_5	Cu_6
NH_2	14,61	21,79	25,66	24,44		
N H	12,47	11,37	14,49	13,38		
N	21,44	29,28	33,78	32,09	26,17	
$HN{=}CH_2$	23,50	31,59	37,01	34,89	28,65	27,22
HN=NH	32,75	31,92	46,13	38,82	31,03	26,58
HN=O	54,07	36,70	65,00	50,25	47,62	33,11
NCS⋯Li	12,82		26,76	25,67		
N_2	14,88	19,91		24,26		
N≡C⋯Li		32,36	31,13	34,93	29,65	28,53

Выводы. Рассмотрев все основные случаи простейших азотсодержащих молекул, перспективных для использования как стабилизаторов нанопорошка меди, авторы выбрали для дальнейших экспериментов нитроксил H–N=O, диазен H–N=N–H и метанимин H–N=CH_2, которые являются синтетически доступными, прочно связывающимися с поверхностью кластера меди молекулами, также проявляющими восстановительные свойства и не нарушающими структуры кластера меди при координации. При этом, заменяя водородный атом на любой объемный заместитель, возможно блокировать доступ к большой площади поверхности кластера различных агрессивных соединений. Следует также отметить, что комплексы кислорода на поверхности медного кластера существенно уступают в прочности структурам, образованным молекулами HN=Y (Y=CH_2, NH, O). Полученные данные позволяют оптимизировать синтез стабилизированных медных наночастиц для их дальнейшего применения в качестве функциональных наноматериалов триботехнического назначения.

Библиографический список

1. Jug, K. Structure and stability of small copper clusters / K. Jug, B. Zimmermann, P. Calaminici, A. M. Köster // J. Chem. Phys. — 2002. — v.116. — p. 4497.

2. Jug, K. Growth pattern and bonding of copper clusters / K. Jug, B. Zimmermann, A. M. Köster // International Journal of Quantum Chemistry. — 2002. — V. 90, № 2. — p. 594–602.

3. Grundner, S. Single-site trinuclear copper oxygen clusters in mordenite for selective conversion of methane to methanol / S. Grundner, M. A. C. Markovits, G. Li, M.Tromp, et al // Nature Communications. — 2014. — V. 6. — p. 7546.

4. Гусев, А. И. Наноматериалы, наноструктуры, нанотехнологии / А. И. Гусев. — Москва : Физматлит, 2007. — 414 с.

5. Помогайло, А. Д. Наночастицы металлов в полимерах / А. Д. Помогайло, А. С. Розенберг, И. Е. Уфлянд. — Москва : Химия, 2000. — 672 с.

6. Губин, С. П. Наночастицы благородных металлов и материалы на их основе / С. П. Губин, Г. Ю. Юрков, Н. А. Катаева. — Москва : Азбука–2000, 2006. — 154 с.

7. Суздалев, И. П. Нанотехнология: физико-химия нанокластеров, наноструктур и наноматериалов / И. П. Суздалев. — Москва : КомКнига, 2006. — 592 с.

8. Мельников, А. Ф. Эффективность применения присадок на основе частиц твердых материалов при приработке деталей двигателей внутреннего сгорания / А. Ф. Мельников // Известия Самарского науч. центра Рос. академии наук. — 2011. — Т. 13, № 4. — С. 1116–1118.

9. Кужаров, А. С. Молекулярные механизмы самоорганизации при трении. Часть VIII. Физико-химические и функциональные свойства некоторых реметаллизантов современного рынка автохимии / А. С. Кужаров, А. А. Кужаров, Х. Нгуен, К. Г. Шучев, А. А. Рыжкин // Трение и износ. — 2015. — Т. 36. — № 1. — С. 62–69.

10. Кужаров, А. С. Ещё раз и несколько иначе о металлоплакировании, фабо- и безызносности / А. С. Кужаров, А. А. Кужаров // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. — 2011. — Т. 13. — № 4–3. — С. 772–775.

11. Соловьев, М. Е. Квантово-химическое моделирование формирования наночастиц из карбоксилатов меди / М. Е. Соловьев, В. И. Иржак // Коллоидный журнал. — 2015. — Т. 77. — № 3. — С. 377–383.

12. Герасина, Ю. С. Квантово-химическое исследование взаимодействия гидридов элементов V–VI групп и их алкилпроизводных с атомами, ионами и малыми кластерами металлов группы Ib / Ю. С. Герасина, А. А. Милов, А. А. Кужаров // Вестник ЮНЦ РАН. — 2015. — Т. 11. — № 2. — С. 23–29.

13. Hay, P. J. Ab initio effective core potentials for molecular calculations - potentials for K to Au including the outermost core orbitals / P. J. Hay, W. R. Wadt // J. Chem. Phys. — 1985. — V. 82. — p. 299–310.

14. Perdew, J. P. Generalized gradient approximation made simple / J. P. Perdew, K. Burke, M. Ernzerhof // Phys. Rev. Lett. — 1996. — V. 77. — p. 3865–3868.

15. Perdew, J. P. Errata: Generalized gradient approximation made simple / J. P. Perdew, K. Burke, M. Ernzerhof // Phys. Rev. Lett. — 1997. — V. 78. — p. 1396–1399.

16. Frisch M. J., Trucks G. W., Schlegel H. B. et al. Gaussian 09. — Gaussian, Inc., Wallingford CT. — 2013.

References

1. Jug, K., Zimmermann, B., Calaminici, P., Köster, A.M. Structure and stability of small copper clusters. J. Chem. Phys., 2002, vol. 116, p. 4497.

2. Jug, K., Zimmermann, B., Köster, A.M Growth pattern and bonding of copper clusters. International Journal of Quantum Chemistry, 2002, vol. 90, no. 2, pp. 594–602.

3. Grundner, S., Markovits, M.A.C., Li, G., Tromp, M., et al. Single-site trinuclear copper oxygen clusters in mordenite for selective conversion of methane to methanol. Nature Communications, 2014, vol. 6, p. 7546.

4. Gusev, A.I. Nanomaterialy, nanostruktury, nanotekhnologii. [Nanomaterials, nanostructures, nanotechnologies.] Moscow: Fizmatlit, 2007, 414 p. (in Russian).

5. Pomogaylo, A.D., Rosenberg, A.S., Uflyand, I.E. Nanochastitsy metallov v polimerakh. [Metal nanoparticles in polymers.] Moscow: Khimiya, 2000, 672 p. (in Russian).

6. Gubin, S.P., Yurkov, G.Y., Kataeva, N.A. Nanochastitsy blagorodnykh metallov i materialy na ikh osnove. [Nanoparticles of noble metals and materials based on them.] Moscow: Azbuka–2000, 2006, 154 p. (in Russian).

7. Suzdalev, I.P. Nanotekhnologiya: fiziko-khimiya nanoklasterov, nanostruktur i nanomaterialov. [Nanotechnology: physics and chemistry of nanoclusters, nanostructures, and nanomaterials.] Moscow: KomKniga, 2006, 592 p. (in Russian).

8. Melnikov, A.F. Effektivnost' primeneniya prisadok na osnove chastits tverdykh materialov pri prirabotke detaley dvigateley vnutrennego sgoraniya. [Efficiency the use of additives on the basis of particles solid materials during aging parts of internal-combustion engines.] Proc. Samara Sci. Center of RAS, 2011, vol. 13, no. 4(3), pp. 1116–1118 (in Russian).

9. Kuzharov, A.S., Kuzharov, A.A., Nguyen X., Shuchev, K.G., Ryzhkin, A.A. Molekulyarnye mekhanizmy samoorganizatsii pri trenii. Chast' VIII. Fiziko-khimicheskie i funktsional'nye svoystva nekotorykh remetallizantov sovremennogo rynka avtokhimii. [Molecular mechanisms of self-organization under friction. Part VIII. Physico-chemical and functional properties of some remetallisants of modern car chemicals market.] Journal of Friction and Wear, 2015, vol. 36, no. 1, pp. 62–69 (in Russian).

10. Kuzharov, A.S., Kuzharov, A.A. Eshche raz i neskol'ko inache o metalloplakirovanii, fabo- i bezyznosnosti. [Again and a little bit differently about metal-cladding, “anf” and wearless.] Proc. Samara Sci. Center of RAS, 2011, vol. 13, no. 4 (3), pp. 772–775 (in Russian).

11. Solovyev, M.E., Irzhak, V.I. Kvantovo-khimicheskoe modelirovanie formirovaniya nanochastits iz karboksilatov medi. [Quantum-chemical simulation of nanoparticles formation from copper carboxylates.] Colloid Journal, 2015, vol. 77, no. 3, 353–358 (in Russian).

12. Gerasina, Yu.S., Milov, A.A., Kuzharov, A.A. Kvantovo-khimicheskoe issledovanie vzaimodeystviya gidridov elementov V–VI grupp i ikh alkilproizvodnykh s atomami, ionami i malymi klasterami metallov gruppy Ib. [The quantum chemical study of hydrides of elements of V-VI groups and their alkyl derivatives with atoms, ions, and small clusters of metals of Ib group.] Vestnik SSC RAS, 2015, vol. 11, no. 2, pp. 23–29 (in Russian).

13. Hay, P.J., Wadt, W.R. Ab initio effective core potentials for molecular calculations - potentials for K to Au including the outermost core orbitals. J. Chem. Phys., 1985, vol. 82, pp. 299–310.

14. Perdew, J.P., Burke, K., Ernzerhof, M. Generalized gradient approximation made simple. Phys. Rev. Lett., 1996, vol. 77, pp. 3865–3868.

15. Perdew, J.P. Burke, K., Ernzerhof, M. Errata: Generalized gradient approximation made simple. Phys. Rev. Lett., 1997, vol. 78, pp. 1396–1399.

16. Frisch M. J., Trucks G. W., Schlegel, H. B., et al. Gaussian 09. Gaussian, Inc., Wallingford CT. 2013.

Поступила в редакцию 08.12.2015
Сдана в редакцию 09.12.2015
Запланирована в номер 22.01.2016

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.791.052 DOI 10.12737/18270

Человеческий фактор в проблеме безопасности сварных объектов ответственного назначения*

А. С. Коробцов[1], В. Ф. Лукьянов[2]**

[1, 2]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Human factor in a safety problem of high-duty welded objects***

A. S. Korobtsov[1], V. F. Lukyanov[2]**

[1, 2]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Цель данной работы — изучение роли человеческого фактора в проблеме надежности ультразвукового контроля сварных объектов ответственного назначения. Проанализированы основные объективные и субъективные факторы, определяющие надежность работы оператора человеко-машинных систем. Показано, что субъективные факторы подразделяются на три основные подгруппы: уровень подготовленности, индивидуальные особенности и функциональное состояние человека-оператора. На основе профессиографического подхода выявлены наиболее важные навыки операторов ультразвукового контроля (УЗК) и разработаны оригинальные тренажерные средства для их целенаправленного формирования. Для обучения и комплексной оценки квалификации операторов УЗК сварных соединений разработано несколько модификаций компьютеризированного тренажера-экзаменатора. На основе проведенного анализа индивидуальных особенностей личности установлено, что в профессии оператора УЗК медико-биологическая структура человека играет важнейшую роль и обусловливает сразу несколько основных профессионально важных качеств. Экспериментально исследовано влияние функционального состояния операторов ультразвукового контроля на результаты профессиональной деятельности.

Ключевые слова: сварные объекты, ультразвуковой контроль, человеческий фактор, индивидуальные особенности, тренажеры, функциональное состояние.

The work goal is to study the human factor role in a safety problem of the ultrasonic testing of high-duty welded objects. The key objective and subjective factors determining the human reliability of the man-machine systems are analyzed. It is shown that subjective factors are divided into three main subgroups: the level of training, individual characteristics and functional state of the human-operator. On the basis of the job specification approach, the most important skills of the ultrasonic testing (UST) operators are determined, and the original training facilities for their purposeful development are worked out. Some modifications of the computerized simulator-examiner for training and the integrated proficiency assessment of the UST operators of the joint welds are developed. Based on the conducted analysis of the individual peculiarities of the personality, it is found that the medicobiologic structure of a person plays a crucial role and determines some basic professionally important qualities for the UST operator occupation. The influence of the functional state of the ultrasonic testing operators on the results of the professional activities is investigated by experiment.

Keywords: welded objects, ultrasonic testing, human factor, individual characteristics, simulators, functional state.

Введение. В настоящее время техногенная безопасность является проблемой мирового масштаба. На территории России насчитывается около 100 тыс. опасных производств и объектов. Из них около 1,5 тыс. — ядерные, 3 тыс. — химические и биологические объекты особо высокой опасности. Следует отметить, что в подавляющем большинстве случаев речь идет о сварных конструкциях. Так, в стране насчитывается более 40 тыс. резервуаров, 22 тыс. городских мостов и путепроводов. В нефтяной и газовой промышленности эксплуатируются более 170 тыс. км магистральных газопроводов и более 50 тыс. км магистральных нефтепроводов [1].

Выполненные в разных организациях исследования реальной дефектности сварных конструкций ответственного назначения показали, что технологические дефекты отмечаются даже при высоком техническом уровне процесса

* Работа выполнена в рамках базового финансирования фундаментальных НИР.

** E-mail: dstu.koras@yandex.ru, vfl1@bk.ru

*** The research is done within the frame of the base financing of the fundamental R&D.

сварки. Так, при автоматической сварке сосудов давления на каждые 10 м шва в среднем приходится 3–4 дефекта, при ручной дуговой сварке их количество возрастает до 35. Согласно заключению Международного института сварки, этой причиной обусловлено около 40 % разрушений сосудов давления и трубопроводов. Проблема техногенной безопасности осложняется тем, что большая часть объектов ответственного назначения в нашей стране выработали плановый ресурс на 50–70 %. 25 % общей протяженности нефтепроводов эксплуатируются свыше 30 лет, 33 % — от 20 до 30 лет. Каждый год происходит 75–80 прорывов на магистральных нефтепроводах, что наносит огромный экологический ущерб. Около 60 % котельного оборудования ТЭС отработало нормативные сроки. Порядка 40 % российских атомных подводных лодок находятся на вооружении более 30 лет [2].

Один из главных путей решения проблемы безопасности данных объектов — их техническая диагностика на основе методов неразрушающего контроля (НК). При этом в 70–80 % случаев при неразрушающем контроле используется УЗК. Однако выявляемость дефектов в ответственных объектах штатным УЗК находится в пределах 45–70 %. Об этом свидетельствуют результаты реализации международной программы PISC (Program of Inspection of Steel Components) [3] и данные российских исследований [4]. С 1997 года регулярно проводится Американо-Европейский семинар по надежности НК, на котором, в частности, была особо отмечена следующая проблема. Человеческий фактор существенно снижает потенциальную надежность и эффективность системы контроля. Таким образом, очевидна необходимость соответствующих научных исследований и разработка мер, позволяющих снизить негативное влияние указанного фактора [5].

Основные составляющие человеческого фактора. На кафедре сварки Донского государственного технического университета (ДГТУ) данный сложный и неоднозначно проявляемый фактор рассматривался с позиций различных научных дисциплин: управление качеством, общая и инженерная психология, эргономика, физиология, научная организация труда.

Анализ состояния вопроса показал, что наибольший опыт в проблеме надежности систем «человек — машина» накоплен в инженерной психологии. В соответствии с положениями данной дисциплины, надежность оператора зависит от многих объективных и субъективных факторов, классификация которых представлена на рис. 1.



Рис. 1. Факторы, влияющие на эффективность работы оператора

К объективным факторам относят в первую очередь внешние — это условия работы (температура, влажность, освещенность, радиоактивность, наличие помех, эргономика). К этой группе факторов относятся также организационные (режим труда и отдыха, отрезок рабочего дня) и эмоциогенные (значимый уровень ответственности, высокая вероятность аварийной ситуации и пр.). В качестве примеров аппаратурных факторов можно назвать чувствительность аппаратуры, применяемые методики и технологии, особенности изделия и т. п.

Субъективные факторы, получившие на практике название «**человеческий фактор**», подразделяются на три основные подгруппы (самостоятельные, но взаимно влияющие друг на друга): уровень подготовки, индивидуальные особенности и функциональное состояние оператора (см. рис. 1). Очевидно, что в данном случае наиболее понятно влияние на результаты работы оператора уровня его подготовки (квалификация, опыт). Роль других подгрупп субъективных факторов (индивидуальные особенности работника и его состояние в процессе деятельности) остается недостаточно исследованной, хотя специалисты отмечают их существенное влияние на результаты работы [6].

На кафедре сварки ДГТУ были выполнены исследования роли человеческого фактора в проблеме надежности ультразвукового контроля сварных объектов. Ниже представлены основные результаты работы.

Уровень подготовки оператора УЗК. Надежность оператора в значительной степени зависит от уровня его профессиональных знаний, навыков, опыта. Успешность обучения операторов предопределяется наличием обоснованного перечня необходимых профессиональных навыков, набора соответствующих технических средств и

количественной оценки профессионального уровня. Перечень необходимых инструментальных и тренажерных средств научно обосновывается с помощью детального инженерно-психологического анализа деятельности оператора.

Нами был проведен анализ деятельности оператора УЗК с учетом основных принципов и положений профессиографического подхода. При этом использовался метод экспертной оценки. Таким образом удалось выявить профессионально важные качества, знания и особенности базовых профессиональных навыков оператора (навык сканирования с определенной скоростью, шагом и амплитудой; навык нахождения максимума амплитуды эхо-сигнала; навык определения формы, координат, протяженности дефектов).

Анализ разработанных в нашей стране и за рубежом специальных тренажерных средств формирования и оценки навыков сканирования оператора УЗК, их достоинств и недостатков позволили сделать следующий вывод. Более перспективным и универсальным представляется создание тренажерной системы для формирования навыков сканирования на базе стандартного персонального компьютера и графического планшета — дигитайзера (рис. 2). Технический уровень и программное обеспечение (ПО) такого оборудования позволяют значительно расширить области целенаправленного формирования моторных навыков [7]. Кроме того, возможности данной тренажерной системы могут постоянно расширяться за счет модернизации ПО.

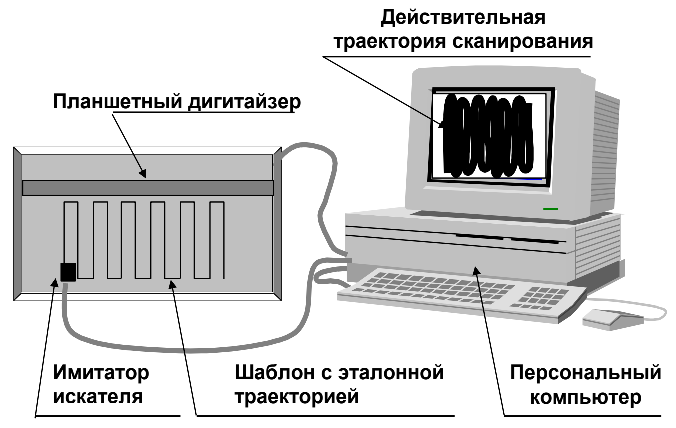


Рис. 2. Тренажерная система для выработки навыков сканирования

Система размещается на стандартном письменном столе. Поверхность дигитайзера используется в качестве рабочей поверхности объекта контроля. Имитатором ультразвукового преобразователя служит аналог мыши для персонального компьютера, выполненный в виде искательной головки. Технические возможности системы позволяют с высокой точностью определять и вводить в компьютер координаты положения искателя на поверхности дигитайзера. При этом возможно не только следить за перемещением искателя, но и создавать различные проблемные ситуации.

Разработано программное обеспечение тренажерной системы, которое состоит из ряда блоков, позволяющих:

— проводить регистрацию обучаемого;

— рассчитывать основные параметры траектории сканирования;

— визуализировать на экране траекторию сканирования с оптимальными параметрами;

— фиксировать текущие параметры реализуемой траектории сканирования;

— анализировать отклонения от идеальной траектории;

— хранить и статистически обрабатывать полученную информацию.

В частности для определения усилия прижатия в имитатор искателя помещен датчик давления, который позволяет фиксировать величину прикладываемого усилия и передавать соответствующую информацию в компьютер.

Система обеспечивает регистрацию скорости сканирования и визуализацию траектории по всей контролируемой зоне. Программный интерфейс предусматривает наличие диалогового меню, позволяющего регулировать амплитуду и шаг сканирования, положение и размеры рабочей зоны.

Данную тренажерную систему можно использовать для обучения, коррекции навыков и аттестации операторов. На стадии обучения возможно целенаправленное формирование моторного навыка сканирования для разных ситуаций:

— с отражением на дисплее траектории сканирования;

— вслепую (рабочая зона не видна обучаемому);

— в условиях ограниченного времени, выделяемого на контроль изделия;

— при сканировании в разных пространственных положениях.

В ходе экспериментов оценивались различные способы обучения. Показателем качества работы выступал процент охваченной при сканировании площади зоны контроля. Установлено, что обучение с использованием шаблона траектории сканирования на поверхности дигитайзера недостаточно эффективно. Отслеживание траектории вызывало у обучаемого определенные трудности, поскольку искатель закрывает значительную часть отслеживаемой траектории. Наблюдалось снижение точности отслеживания движения, неравномерный охват участка сканирования по высоте. Отмечалось увеличение скорости перемещения искателя, обусловленное, вероятно, тем, что при обучении с использованием шаблона происходит подмена целей обучения — главным становится сам процесс копирования. Обратные связи были выражены слабо. Данный вид обучения характеризовался высокой утомляемостью, высоким разбросом результатов, требовал длительных упражнений.

При обучении способом «вслепую» движения обучаемых характеризовались частой сменой темпа, аритмичностью, непостоянством амплитуды движений. Как правило, колебания параметров сканирования превышали требуемый уровень.

Установлено, что в процессе обучения самоконтроль оператора обеспечивает наилучший способ обучения, при котором можно корректировать свои действия, ориентируясь на изображение следа движения искателя на мониторе. В данном случае обратная связь позволяет оператору сопоставлять совершаемые моторные действия с представленными оптимальными параметрами траектории сканирования. На основании такого сопоставления на стадии обучения все правильные и неправильные действия оцениваются и регулируются в реальном времени — т. е. целенаправленно формируется моторный навык сканирования.

Для обучения и комплексной оценки квалификации операторов УЗК сварных соединений в ДГТУ разработан компьютеризированный тренажер-экзаменатор. Его оформление имеет несколько модификаций в зависимости от объекта контроля и внешнего вида корпуса. В качестве объекта контроля в первых модификациях тренажера [8] использовалось реальное сварное соединение, выполненное по штатной технологии и представляющее собой тело вращения в виде толстостенной трубы. В двух кольцевых сварных швах объекта контроля содержатся трещиноподобные дефекты заданных размеров и местоположения, созданные по разработанным на кафедре технологиям [9]. Внешний вид одной из модификаций тренажера представлен на рис. 3



Рис. 3. Внешний вид тренажера с объектом контроля в виде толстостенной трубы

Другая модификация компьютеризированного тренажера представлена на рис. 4. Конструктивно тренажер выполнен в виде стола с плоскостью, наклоненной под углом 15°. В крышке стола имеется окно в форме сегмента, открывающее доступ к объекту контроля. Дефектоскоп устанавливается на верхнюю крышку корпуса тренажера.



Рис. 4. Тренажер-экзаменатор ТЭД-3 с объектом контроля в виде плоского диска

В экспериментах участвовали операторы различной квалификации. Каждый оператор работал на тренажере в течение недели по 6–8 часов в день. При этом стояла задача определить максимум амплитуды эхо-сигналов от различных по размеру искусственных дефектов, которые предъявлялись случайным образом. За время эксперимента операторы измеряли каждый дефект многократно (50–70 раз), что позволило провести статистический анализ полученных результатов.

В первые дни работы имел место существенно больший разброс значений измерений (как правило, он зависит от квалификации, индивидуальных особенностей испытуемых, особенностей дефектов). Отмечено, что к концу эксперимента разброс уменьшался, а среднее значение измеренной максимальной амплитуды сигнала стремилось к некоторому характерному для данного дефекта относительно стабильному уровню. У ряда операторов были зафиксированы ошибки, связанные с невнимательностью, — так называемые промахи, которые носили случайный характер и зависели от индивидуальных особенностей испытуемых. Отмечен факт недобраковки в зоне измерений двух близко расположенных дефектов разных размеров. Статистическая обработка результатов измерений максимальной амплитуды эхо-сигналов показала, что независимо от квалификации операторов в так называемых областях малой вероятности имеет место отклонение от нормального закона распределения.

Кроме того, эксперименты в очередной раз подтвердили, что при длительных перерывах в работе навыки забываются. Это происходит даже с высококвалифицированными операторами. Чтобы восстановить навыки и вновь продемонстрировать высокий профессиональный уровень, требуются тренировки.

В рамках договорных обязательств комплексные тренажеры были изготовлены для AEA Technology (Рисли, Великобритания), ВНИИ АЭС (Москва), учебных центров по подготовке операторов УЗК.

Индивидуальные особенности личности. В практической психологии под индивидуальными особенностями личности понимают ее психологические свойства и особенности, обычно называемые «чертами личности». Для удобства исследования и обобщения психологи рассматривают многообразие свойств личности в рамках ограниченного числа подструктур.

Базовым уровнем личности является биологически обусловленная подструктура, в которую входят возрастные, половые свойства психики, врожденные свойства нервной системы и темперамент. Следующая подструктура объединяет индивидуальные психические и психофизиологические особенности человека — врожденные и приобретенные, наработанные. Отдельная подструктура личности — социальный опыт (приобретенные в социуме знания, умения, привычки).

В биологически обусловленной подструктуре личности особая роль принадлежит типологическим свойствам нервной системы, которые характеризуются силой, динамикой, лабильностью и подвижностью нервных процессов. Данные свойства определяют:

— легкость переключения с одного вида деятельности на другой,
— скорость запоминания и вспоминания,
— способность действовать при монотонии,
— работоспособность в условиях утомления.

Тип нервной системы, в свою очередь, обусловливает темперамент. Под темпераментом обычно понимают индивидуальные динамические аспекты поведения, преимущественно врожденного характера. Следует отметить, что в некоторых видах деятельности достижение высокого профессионального уровня возможно только при ярко выраженных особенностях того или иного темперамента.

Психические и психофизиологические процессы определяют такие особенности личности, как когнитивная (познавательная), моторно-двигательная, эмоционально-волевая. Значительное влияние на результаты работы оператора оказывают такие свойства личности, как ответственность, самоконтроль, эмоциональная устойчивость.

Таким образом, управление конкретной профессиональной деятельностью требует детального анализа индивидуальных данных человека. На этой основе могут быть сформулированы критерии профессионального отбора, разработаны оборудование и программное обеспечение, позволяющие целенаправленно формировать требуемые качества [10, 11].

Самым сложным и неисследованным вопросом надежности оператора УЗК является определение биологических и психологических критериев профотбора (в отличие от образовательных и медицинских критериев).

На основе проведенного нами анализа установлено, что медико-биологическая структура личности в профессии оператора УЗК играет важнейшую роль и обусловливает сразу несколько основных профессионально важных качеств: педантизм, способность длительное время концентрировать внимание и совершать однообразные моторные движения, быстрая реакция, уверенность при принятии решений, эмоциональная устойчивость.

Детальный анализ психологических и физиологических особенностей, необходимых для той или иной трудовой деятельности, позволил сформулировать гипотезу о зависимости профессиональной пригодности от биологически обусловленных структур личности. Итак, особенности проявления в производственной деятельности различных составляющих медико-биологической структуры личности были исследованы и сопоставлены с базовыми профессионально важными качествами операторов УЗК. В результаты были определены темпераменты и характеры, предпочтительные для данной работы. Для подтверждения гипотезы сформирован комплект психодиагностических и инструментальных средств и проведены психодиагностические исследования [12]. В течение пяти лет в экспериментах приняли участие 225 испытуемых. Среди них — представители и ярко выраженных, и так называемых смешанных типов темперамента.

Зафиксировано, что от темперамента в значительной степени зависит реализация тех или иных профессионально важных качеств. Иными словами, можно утверждать, что профессиональное развитие в определенной области зависит от типа темперамента специалиста.

Таким образом, формирование профессионально важных качеств операторов УЗК должно учитывать темперамент, который следует определить до начала обучения. Очевидно, что это позволит заранее выяснить, какие профессионально важные качества будут формироваться с наибольшими сложностями, и уделить им особое внимание.

В ходе проведенных изысканий было установлено, что в наибольшей степени профессия оператора УЗК подходит лицам с флегматическим типом темперамента. Они продемонстрировали самую высокую степень соответствия профессии. При этом в отношении флегматиков не зафиксированы средняя и высокая степени несоответствия.

Второе место по числу «соответствующих» заняли испытуемые с сангвиническим темпераментом, третье — меланхолики (при этом по числу «несоответствующих» они на втором месте).

Анализ показал, что большинство холериков, принявших участие в исследованиях, посчитали себя «не соответствующими» профессии. Кроме того, выяснилось, что, получив данную специальность, значительная часть таких испытуемых стремились бы к смене профессиональной деятельности.

Результаты исследований позволяют утверждать, что для работы в качестве оператора УЗК подходят не все темпераменты. Рассматриваемые степени профессиональной пригодности — желательная, допустимая, нежелательная. Выяснилось, что для оператора УЗК желательным темпераментом является флегматический, допустимыми — сангвинический и меланхолический, нежелательным — холерический.

Функциональное состояние. Функциональное состояние влияет на результаты работы человека в конкретный момент времени при решении конкретных задач. Несмотря на актуальность, данная проблема явно недостаточно проработана в психологической науке, особенно в ее прикладных направлениях. Наблюдается колоссальный дисбаланс между теоретическими и экспериментальными исследованиями.

Учитывая сложность проблемы, при разработке блок-схемы исследований был проанализирован имеющийся опыт исследования роли состояния в операторской деятельности. С позиций инженерной психологии классифицированы виды психических состояний оператора УЗК и выявлены неблагоприятные для профессиональной деятельности (монотония, утомление, напряженность и т. п.). В перечисленных случаях возрастает вероятность значимых ошибок из-за снижения зрительной чувствительности, дезинтеграции сложных навыков, снижения

продуктивности мышления, замедления реакции. Рассмотрены наиболее значимые характеристики, адекватно отражающие функциональное состояние оператора УЗК, проанализированы существующие биологические, физиологические и психологические методы, выполнена количественная оценка. Полученные результаты позволяют сформировать набор психодиагностических средств, соответствующих задачам данного исследования.

Эксперименты проводились в проблемной лаборатории ДГТУ и лаборатории неразрушающего контроля AEA Technology (Рисли, Великобритания) в рамках договора о совместном сотрудничестве. В исследованиях принимали участие британские и российские операторы УЗК — как молодые, так и имеющие значительный опыт контроля сварных соединений атомного энергетического оборудования. Эксперименты проводились по разным программам (от 8 до 11 дней) по 5–12 часов в сутки [13]. В процессе ежедневных испытаний выполнялись такие виды работ, как настройка дефектоскопа (оценивалась точность нахождения максимума эхо-сигнала), контроль по стандартной технологии тест-образцов с внутренними дефектами. Кроме того, использовались специализированные тренажеры. Каждый день (как правило, утром, днем и вечером) проводилось диагностическое обследование операторов для оценки их функционального состояния. Оно оценивалось по психологическим и физиологическим показателям с использованием тестов: «САН» (самочувствие, активность, настроение), «Шкала самооценки» (личностная и реактивная тревожность), «Статический глазомер», «Перепутанные линии». При этом фиксировались такие показатели, как время латентного периода сенсорной реакции, частота сердечных сокращений и дыхания, среднее динамическое давление, температура тела, электрокардиограмма.

В рамках исследований было отмечено, что у некоторых операторов показатели функционального состояния в течение дня характеризуются существенной нестабильностью. Зафиксирована тесная связь между показателями «самочувствие» и «реактивная тревожность». При сравнительном анализе результатов тестирований разных операторов выявлено существенное влияние индивидуальных особенностей на абсолютные значения времени реакции. Установлена зависимость результатов профессиональной деятельности оператора УЗК от фактора врабатываемости. Так, более дифференцированный анализ результатов экспериментов показал, что наибольшая погрешность измерений наблюдается в самом начале работы — приблизительно в течение первых тридцати минут. Этот факт был отмечен в подавляющем большинстве случаев — 88,9 %.

Общий анализ исследований позволяет утверждать, что отсутствуют линейные математически описываемые взаимосвязи между функциональным состоянием операторов и результатами их профессиональной деятельности. Это объясняется сложностью и неоднозначностью влияния данного многоуровневого субъективного фактора на результаты неразрушающего контроля. Выявлено, что с понижением показателей функционального состояния операторов УЗК отмечается тенденция к повышению средней ошибки и существенному увеличению разброса показателей результатов производственной деятельности. Отмечено, что стабильность (нестабильность) функционального состояния операторов УЗК влияет на результаты контроля в целом и на точность настройки дефектоскопа.

По-видимому, функциональное состояние человека следует рассматривать как степень психологической готовности реализовать свои профессиональные возможности. При этом очевидно, что нестабильность функционального состояния является фактором риска, предпосылкой к ухудшению результатов работы. В данном случае будут отмечаться снижение внимания, продуктивности мышления, зрительной чувствительности, дезинтеграция сложных навыков, нарушение тонкой координации.

Полученные результаты явились вкладом российской стороны в реализацию европейской программы TACIS R 2.05, секция «Человеческий фактор».

Выводы. Потенциальную надежность систем ультразвукового контроля сварных объектов ответственного назначения существенно снижает человеческий фактор — а именно уровень подготовки оператора, его индивидуальные особенности и функциональное состояние. Необходимые профессиональные навыки могут быть сформированы с помощью специальных тренажерных средств. Что касается индивидуальных особенностей, то важнейшую роль в профессии оператора УЗК играют медико-биологические данные, обусловливающие основные профессионально важные качества. Ухудшение показателей функционального состояния оператора следует рассматривать как фактор риска, предпосылку к снижению надежности системы контроля.

Библиографический список

1. Стеклов, О. И. Проблемные задачи сварочного производства в России / О. И. Стеклов // Сварочное производство. — 2000. — № 12. — С. 3–7.

2. Диагностика технических устройств / Г. А. Бигус [и др.]. — Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014. — 587 с.

3. Crutzen, S. Summary of the PISC II project: PISC II report № 1 — June1985 / S. Crutzen // International Journal of Pressure Vessels and Piping. — 1987. — Vol. 28. — P. 311–346.

4. Щербинский, В. Г. Технология ультразвукового контроля сварных соединений / В. Г. Щербинский. — Москва : Тиссо, 2005. — 326 с.

5. Американо-Европейский семинар по надежности НК / ООО «Изд. дом «Спектр» // Контроль. Диагностика. — 2000. — № 10. — С. 52.

6. Гурвич, А. К. Надежность неразрушающего контроля как надежность комплекса «дефектоскоп — оператор — среда» / А. К. Гурвич // Дефектоскопия. —1992. — № 3. — С. 5–12.

7. Коробцов, А. С. Тренажер для целенаправленного формирования навыков сканирования у операторов УЗК / А. С. Коробцов, В. Ф. Лукьянов, Э. П. Горбачевская // Контроль. Диагностика. — 2004. — № 11. — С. 51–53.

8. Лукьянов, В. Ф. Экзаменатор надежности оператора УЗК / В. Ф. Лукьянов, А. С. Коробцов, Н. П. Алешин // Дефектоскопия. — 1995. — № 10. — С. 38–43.

9. Коробцов, А. С. Методики создания искусственных дефектов заданных размеров и местоположения / А. С. Коробцов // Заводская лаборатория. — 2004. —№ 11. — С. 51–53.

10. Коробцов, А. С. Человеческий фактор в производственной деятельности / А. С. Коробцов, М. В. Сагирова // Проблемы теории и практики управления. — 2012. — № 4. — С. 48–51.

11. Коробцов, А. С. Человеческий ресурс в системе менеджмента качества сварочной продукции / А. С. Коробцов // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2011. — № 9 — С. 1611–1620.

12. Коробцов, А. С. Роль оператора в обеспечении достоверности ультразвукового контроля опасных объектов / А. С. Коробцов // Безопасность жизнедеятельности. — 2007. — № 12. — С. 4–9.

13. Коробцов, А. С. Влияние функционального состояния оператора УЗК на результаты профессиональной деятельности / А. С. Коробцов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Проблемы машиностроения. —2005. — Специальный выпуск. — С. 108–112.

References

1. Steklov, O.I. Problemnye zadachi svarochnogo proizvodstva v Rossii. [Problem tasks of welding production in Russia.] Svarochnoe Proizvodstvo, 2000, no. 12, pp. 3–7 (in Russian).

2. Bigus, G.A., et al. Diagnostika tekhnicheskikh ustroystv. [Technical equipment diagnostics.] Moscow: Bauman MSTU Publ. House, 2014, 587 p. (in Russian).

3. Crutzen, S. Summary of the PISC II project: PISC II report no. 1, June1985. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 1987, vol. 28, pp. 311–346.

4. Shcherbinskiy, V.G. Tekhnologiya ul'trazvukovogo kontrolya svarnykh soedineniy. [Ultrasonic testing technology of welded joints.] Moscow: Tisso, 2005, 326 p. (in Russian).

5. Amerikano-Evropeyskiy seminar po nadezhnosti NK. [US-European Workshop on NC Reliability.] Izdatel'skiy dom "SPEKTR". Testing. Diagnostics, 2000, no. 10, pp. 52 (in Russian).

6. Gurvich, A.K. Nadezhnost' nerazrushayushchego kontrolya kak nadezhnost' kompleksa «defektoskop — operator — sreda». [Non-destructive testing reliability as reliability of the “flaw detector – operator – environment” complex.] Russian Journal of Nondestructive Testing, 1992, no. 3, pp. 5–12 (in Russian).

7. Korobtsov, A.S., Lukyanov, V.F., Gorbachevskaya, E.P. Trenazher dlya tselenapravlennogo formirovaniya navykov skanirovaniya u operatorov UZK. [Simulator for the purposeful formation of scanning skills of ultrasonic testing operators.] // Testing. Diagnostics. 2004, no. 11, pp. 51–53 (in Russian).

8. Lukyanov, V.F., Korobtsov, A.S., Aleshin, N.P. Ekzamenator nadezhnosti operatora UZK. [Examiner of ultrasonic testing operator reliability.] Russian Journal of Nondestructive Testing, 1995, no. 10, pp. 38–43 (in Russian).

9. Korobtsov, A.S. Metodiki sozdaniya iskusstvennykh defektov zadannykh razmerov i mestopolozheniya. [Methods of creation of artificial defects of the specified sizes and location.] Industrial laboratory. Material diagnostics. 2004, no. 11, pp. 51–53 (in Russian).

10. Korobtsov, A.S., Sagirova, M.V. Chelovecheskiy faktor v proizvodstvennoy deyatel'nosti. [Human factor in production activities.] Theoretical and Practical Aspects of Management, 2012, no. 4, pp. 48–51 (in Russian).

11. Korobtsov, A.S. Chelovecheskiy resurs v sisteme menedzhmenta kachestva svarochnoy produktsii. [Human resource in quality management system of welded products.] Vestnik of DSTU, 2011, no. 9, pp. 1611–1620 (in Russian).

12. Korobtsov, A.S. Rol' operatora v obespechenii dostovernosti ul'trazvukovogo kontrolya opasnykh ob"ektov. [The role of operator in adequacy of ultrasonic testing of hazardous objects.] Life Safety, 2007, no. 12, pp. 4–9 (in Russian).

13. Korobtsov, A.S. Vliyanie funktsional'nogo sostoyaniya operatora UZK na rezul'taty professional'noy deyatel'nosti. [Influence of the functional state of ultrasonic testing operator on the professional activities results.] University News. North-Caucasian region. Machine Building problems. 2005, Spec. Iss., pp. 108–112 (in Russian).

Поступила в редакцию 29.07.2015
Сдана в редакцию 30.07.2015
Запланирована в номер 22.01.2016

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621. 762. 1 DOI 10.12737/18272

Повышение механических свойств горячедеформированных порошковых сталей*

М. С. Егоров[1], Р. В. Егорова[2], В. Н. Пустовойт[3]**
[1,2] Донской государственный технический университет, г. Волгодонск, Российская Федерация
[3] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Strengthening of hot-worked powder steels***

M. S. Yegorov[1] , R. V. Yegorova [2],V. N.Pustovoyt[3]**
[1,2] Don State Technical University, Volgodonsk, Russia
[3] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

Целью работы являлось изучение основополагающих процессов формирования горячедеформированных порошковых сталей (ГДПС), а также сращивание материала частиц на уже имеющихся и вновь образующихся контактных поверхностях. Роль сращивания особенно велика при производстве материалов, работающих в нагруженных условиях. Очевидно, что какая бы ни была структура в объеме материала, окруженном бывшей поверхностью частицы порошка, до определенного уровня сращивания свойства порошкового материала будут определяться не морфологическими структурными особенностями, а качеством сращивания. Поэтому исследование межчастичного сращивания при формировании ГДПС остается актуальной задачей порошкового материаловедения. Таким образом, дополнительная обработка давлением горячедеформированных порошковых сталей может быть предложена не только для формоизменения, но и для повышения уровня их механических свойств.

Ключевые слова: порошковая металлургия, горячая деформация, межчастичное сращивание, легирующие элементы.

The work objective is to study the fundamental processes of forming hot-worked powder steels (HWPS) and bonding the particulate material on the existing and newly formed contact surfaces. The role of splicing is particularly great in the process of manufacturing materials under the strained conditions. Evidently, whatever the structure in the amount of the material surrounded by the former powder particle surface, the powder material properties will be determined not by the morphological structural features, but by the splice quality up to a defined level of splicing. Therefore, the study of interparticle splicing in the formation of HWPS is a crucial task of the materials technology. Thus, further processing of hot pressurized powder steels can be offered not only for forming, but to improve their mechanical properties as well.

Keywords: powder metallurgy, hot deformation, interparticle splicing, alloying elements.

Введение. Сравнение свойств горячедеформированных и экструдированных порошковых материалов идентичного химического состава показывает, что последние обладают более высоким уровнем механических свойств [1–3]. Это различие может быть объяснено различной степенью завершения межчастичного сращивания. В работах по исследованию межчастичного сращивания основное внимание уделялось условиям, при которых происходит формирование внутрикристаллитного сращивания на технологических стадиях получения горячедеформированных порошковых материалов (ГДПМ)[4,5]. Однако последние результаты механических испытаний ГДПМ из железного порошка при пониженной температуре показали, что существует зависимость между степенью завершения сращивания и температурой горячей допрессовки [6].

Поэтому исследование возможности повышения свойств ГДПС представляет определенный практический интерес. Одним из способов достижения этой цели является дополнительная ограниченная объемная пластическая

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
** E-mail: aquavdonsk@mail.ru, fipm-dstu@mail.ru
*** The research is done within the frame of the independent R&D.

деформация. Для того, чтобы использовать аналитическое описание процесса уплотнения и развития контактной поверхности, полученное для сферической формы металлических частиц, экспериментальная часть исследования выполнялась с применением в качестве исходного материала железного порошка марки Atomet 4601 [7].

Экспериментальная часть. Образцы изготовлялись по следующей технологии: статическое холодное прессование (интервал значений исходной пористости 12–40 %), горячая допрессовка при температурах 950–1150°С (остаточная пористость<0,5%), объемная деформация в закрытом штампе в том же интервале температур. Из призматических прессовок вытачивались образцы с рабочей частью диаметром 5 мм для испытаний на статическое растяжение при комнатной температуре (ГОСТ 1497) и при охлаждении до –120°С. Во втором случае использовали методику испытаний, описанную в [8]. Криостат заполнялся смесью жидкого азота и петролеумного эфира. В процессе хрупкого низкотемпературного разрушения не происходит образования шейки, сопровождающее разрушение при комнатной температуре, что повышает точность определения площади контактного сечения.

Результаты низкотемпературного разрушения представлены на рис. 1. Значения низкотемпературного предела прочности практически не зависят от значения исходной пористости, которая варьировалась в отмеченном выше интервале. Механические свойства при комнатной температуре определялись на образцах с исходной пористостью 30%, являющейся оптимальной для используемой марки порошка [9].
Обращает на себя внимание тот факт, что с повышением температуры горячей допрессовки низкотемпературный предел прочности увеличивается, и при 1150°С его значение составляет 850 МПа независимо от исходной пористости.

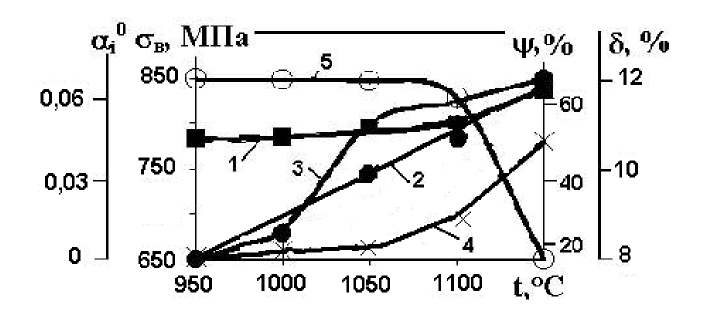


Рис.1. Зависимость предела прочности ГДПМ при 20°С (1) и 20°С (2), относительного удлинения (3), относительного сужения (4) и контактного сечения с незавершенным сращиванием (5) от температуры горячей допрессовки

С повышением температуры горячей допрессовки наблюдается повышение как прочности, так и пластичности ГДПС (линии 2–4). Максимум механических свойств достигается при 1150°С. Это обстоятельство позволяет рассматривать образец, полученный при этой температуре, в качестве эталона, характеризующего завершение процесса формирования внутрикристаллитного сращивания на всей контактной поверхности. Факт ярко выраженной зависимости низкотемпературного предела прочности ГДПС от температуры горячей допрессовки может быть объяснен следующим образом. Образцы получены в условиях горячего уплотнения в закрытой матрице и имеют одинаковую остаточную пористость до 0,5%. Так как в данных условиях уплотнения площадь контактного сечения является функцией пористости и совпадает по величине с площадью номинального поперечного сечения, то отмеченное отличие ГДПС в значениях предела прочности связано с незавершенностью межчастичного сращивания на определенном участке контактной поверхности, выпадающей из несущего внешнее нагружение сечения. Сопоставление значений низкотемпературного предела прочности у ГДПС, полученного при различных температурах горячей допрессовки, и эталона позволяет количественно определить относительную долю контактного сечения с незавершенным сращиванием (α_i^0) (рис.1, линия 5).

$$\alpha_i^0=1-\sigma_{вi}/\sigma_э,$$

где $\sigma_{вi}$ — низкотемпературный предел прочности ГДПС;
$\sigma_э$ — низкотемпературный предел прочности эталона.

Наличие в структуре ГДПС участков контактной поверхности с незавершенным сращиванием следует рассматривать как элемент, облегчающий разрушение и, следовательно, играющий роль концентратора напряжений. Повышение уровня механических свойств ГДПС возможно путем устранения отмеченного структурного элемента в результате дополнительной обработки давлением порошкового образца [10]. Для проведения этой операции горячедеформированные образцы подвергались механической обработки для создания необходимого бокового зазора между ними и стенками матрицы и затем деформировались в горячем состоянии объемной штамповкой. Степень дополнительной горячей деформации определялась зазором между матрицей и образцом. Результаты исследования показаны на рис. 2.

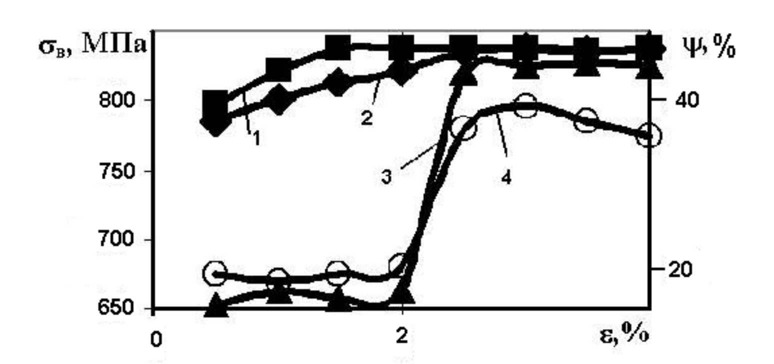


Рис.2. Зависимость механических свойств ГДПС от степени дополнительной пластической деформации: 1, 2 — -120°С (1); 3,4 — 20°С; 1,2,3 — $\sigma_в$; 4 — ψ

Кривая 1 относится к ГДПС, горячая допрессовка которого проводилась при 1100°С, кривые 2–4 соответствуют ГДПС, полученному при 950°С. Дополнительная объемная деформация проводилась при 1000°С.

Обсуждение и результаты. Скачкообразное увеличение прочности и пластичности материала, наблюдаемое при степени деформации 2,5%, свидетельствует о завершении сращивания. При этой степени деформации низкотемпературный предел прочности достигает эталонное значение, которое на меняется при дальнейшем деформировании. Отмеченное значение степени дополнительной пластической деформации может быть истолковано как критическая величина, характеризующая минимальную степень деформирования, достаточную для завершения сращивания на всей контактной поверхности. Эта величина является функцией температуры горячей допрессовки, с повышением которой она монотонно уменьшается. Так при проведении горячей допрессовки пористой заготовки при 1100°С критическая степень деформации составляет 1,5%.

Выводы. Таким образом, дополнительная обработка давлением горячедеформированных порошковых сталей может быть предложена не только для формоизменения, но и для повышения уровня их механических свойств. Степень пластической деформации зависит от относительной площади контакного сечения с незавершенным при горячей допрессовки межчастичным сращиванием.

Библиографический список

1. Friedman G. Properties of extruded Metal Powder. The International journal of Powder metallurgy and Powder Technology, 1980.– vol. 16.– №1.– P. 29 -36.

2. Sheppard T., Meshane H. Analysis of pressure requirements for Powder Metallurgy // The International journal of Powder metallurgy and Powder Technology.– 1976.– V. 19.– № 3.– P. 121 - 125.

3. Henrik Karlsson, Lars Nyborg, and Ola Bergman. Surface Interactions during Sintering of Water- atomized Pre-alloyed Steel Powder// Euro PM 2004 Powder Metallurgy World Congress& Exhibition Austria Centre Viena, Austria 17-21 October 2004, Volume 3, page 23-28.

4. Сращивание на контактных поверхностях при различных технологических вариантах горячей обработки давлением порошковых материалов / Ю. Г. Дорофеев, В. Ю. Дорофеев, С. Н. Егоров и др. // Порошковая металлургия. — 1986. — №10. — С.31–34.

5. Процессы сращивания в порошковых горячештампованных материалах на основе железа. Сообщения 1–3 / Б. Ю. Дорофеев, В. Ю. Дорофеев, Ю. Н. Иващенко и др. // Порошковая металлургия. — 1988. — № 6. — С. 27–32.

6. Дорофеев, В. Ю. Межчастичное сращивание при формировании порошковых горячедеформированных материалов. / В. Ю. Дорофеев, С. Н. Егоров / — Москва : Металлургиздат, 2003. — 151 с.

7. Егоров, С. Н. Контактная и свободная поверхности пористого тела как функции пористости / С. Н. Егоров, Т. Н. Кичик, В. А. Гийденко // Порошковые и композиционные материалы. Структура, свойства, технология : сб. науч. трудов. Южно-Рос. гос. техн. ун-т. — Новочеркасск : ЮРГТУ, 2001.— С.22–26.

8. Методы исследования механических свойств металлов / Под ред. С. И. Кишкиной, Н. М. Склярова. // Москва : Машиностроение, 1974. — 320 с.

9. Дорофеев, Ю. Г. Динамическое горячее прессование пористых порошковых заготовок / Ю. Г. Дорофеев. — Москва : Металлургия, 1977. — 216 с.

10. Дорофеев, В. Ю. Развитие активированной контактной поверхности при формировании горячештампованных порошковых материалов / В. Ю. Дорофеев, М. С. Егоров, С. Н. Егоров. // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. техн. науки. — 2004. — №1. — С.64–66.

References

1. Friedman G. Properties of extruded Metal Powder. The International journal of Powder metallurgy and Powder Technology, 1980, vol. 16, no. 1, pp. 29 -36.

2. Sheppard T., Meshane H. Analysis of pressure requirements for Powder Metallurgy. The International journal of Powder metallurgy and Powder Technology, 1976, vol. 19, no. 3, pp. 121 - 125.

3. Henrik Karlsson, Lars Nyborg, and Ola Bergman. Surface Interactions during Sintering of Water- atomized Pre-alloyed Steel Powder. Euro PM 2004 Powder Metallurgy World Congress& Exhibition Austria Centre, Viena, Austria, 17-21 October 2004, vol. 3, pp. 23-28.

4. Dorofeev, Y.G., Dorofeev, V.Y., Yegorov, S.N., et al. Srashchivanie na kontaktnykh poverkhnostyakh pri razlichnykh tekhnologicheskikh variantakh goryachey obrabotki davleniem poroshkovykh materialov. [Splicing at the contact surfaces at different hot working technological options of powder materials.] Powder Metallurgy, 1986, no. 10, pp. 31‒34 (in Russian).

5. Dorofeev, Y.G., Dorofeev, V.Y., Ivashchenko, Y.N., et al. Protsessy srashchivaniya v poroshkovykh goryacheshtampovannykh materialakh na osnove zheleza. Soobshcheniya 1–3. [Splicing processes in hot-stamped iron-based powder materials. Reports 1-3.] Powder Metallurgy, 1988, no. 6, pp. 27–32 (in Russian).

6. Dorofeev, V.Y., Yegorov, S.N. Mezhchastichnoe srashchivanie pri formirovanii poroshkovykh goryachedeformirovannykh materialov. [Interparticle splicing under the formation of hot powdered materials.] Moscow: Metallurgizdat, 2003, 151 p. (in Russian).

7. Yegorov, S.N., Kichik, T.N., Giydenko, V.A. Kontaktnaya i svobodnaya poverkhnosti poristogo tela kak funktsii poristosti. [Contact and free surfaces of a porous body as a porosity function.] Poroshkovye i kompozitsionnye materialy. Struktura, svoystva, tekhnologiya: sb. nauch. trudov. [Powder and composite materials. Structure, properties, and technology: Coll. Sci. Papers.] South-Russian State Technical University. Novocherkassk: YuRGTU, 2001, pp. 22–26 (in Russian).

8. Kishkina, S.I., Sklyarova, N.M., eds. Metody issledovaniya mekhanicheskikh svoystv metallov. [Investigative techniques of mechanical properties of metals.] Moscow: Mashinostroenie, 1974, 320 p. (in Russian).

9. Dorofeev, Y.G. Dinamicheskoe goryachee pressovanie poristykh poroshkovykh zagotovok. [Dynamic hot pressing of porous powder blanks.] Moscow: Metallurgiya, 1977, 216 p. (in Russian).

10. Dorofeev, V.Y., Yegorov, M.S. Yegorov, S.N. Razvitie aktivirovannoy kontaktnoy poverkhnosti pri formirovanii goryacheshtampovannykh poroshkovykh materialov. [Development of the activated contact surface under the formation of hot-stamped powder materials.] University News. North-Caucasian region. Technical Sciences Series, 2004, no. 1, pp. 64–66 (in Russian).

Поступила в редакцию 04.12.2015
Сдана в редакцию 04.12.2015
Запланирована в номер 22.01.2016

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.9 DOI 10.12737/18273

Повышение производительности обработки и качества отверстий в слоистом армированном титаном стеклопластике за счет снижения виброактивности процесса сверления*

С. Н. Шевцов[1], В. В. Сибирский[2], Е. Г. Чигринец[3]**
[1] Южный научный центр Российской академии наук, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[3] ОАО «Роствертол», г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Increase in efficiency of quality and hole-making in glass-reinforced titanium laminate by reducing drilling vibroactivity ***

S. N. Shevtsov[1], V. V. Sibirskiy[2], E. G. Chigrinets[3]**
[1] Southern Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[3] "Rostvertol" JSC, Rostov-on-Don, Russian Federation

Цель данной работы — установить, каким образом конструктивно-геометрические параметры сверл влияют на качество обработанных отверстий, производительность и динамику процесса механической обработки высокопрочного полимерного композиционного материала — стеклопластика, армированного титановой фольгой. В особо нагруженных полимерных композитных конструкциях используются пакеты усиления из титановой фольги, размещаемые между слоями армирующей стекло- или углеленты. Обработка в несколько переходов и использование остро заточенного инструмента обеспечивают требуемую точность размеров, макро- и микрогеометрию поверхности отверстий, позволяют избежать расслоений материала. Исследован процесс сверления слоистых стеклопластиков при различных схемах заточки сверл из быстрорежущей стали. Полученные данные позволяют определить оптимальные тип инструмента и режим обработки, учитывая зависимость высотных параметров шероховатости, характера и величины расслоений в местах входа (выхода) сверла. С использованием разработанной компьютеризированной системы измерения крутящего момента определена виброактивность процесса сверления и ее связь с показателями качества. Разработаны предложения по усовершенствованию технологии обработки отверстий в стеклопластиковых лонжеронах несущих и рулевых винтов вертолетов.

Ключевые слова: армированный стеклопластик, расслоения, двойная заточка сверла, виброактивность, крутящий момент, сверление стеклопластика.

The work objective is to study the impact of the drill design value and geometrics on the quality of the processed holes, the efficiency, and the machining dynamics of the high-strength polymer composite — fiberglass plastic reinforced by titanium foil. Packs of the reinforcing layers made from the titanium foil or carbon fiber tapes are often used in the highly-loaded polymer composite structures. Processing in several operations and the application of sharp-ground tools provide the required dimensional accuracy, the surface macro- and microgeometry of the hole, and allow avoiding the delamination. The process of drilling fiberglass laminates under different patterns of HSS drills sharpening is studied. The data obtained allow determining the optimum type of instrument and operation mode taking into account the dependence of the high-altitude roughness parameters, the nature and amount of delamination in the entry (exit point) of the drill. The vibroactivity of the drilling process and its relationship with the quality metrics are studied using the computer-aided torque-sensing system. Some proposals for improving the hole-making technology applying to the glass-fiber spars of the main and tail helicopter rotors are developed.

Keywords: glass fiber reinforced plastic (GFRP), delamination, double-angle drill sharpening, vibroactivity, torque effect, fiberglass drilling.

* Работа выполнена по грантам РФФИ 14-08-31612 мол_а, 15-08-00849.
** E-mail: sergnshevtsov@gmail.com, semo_s@mail.ru, egchigrinets@gmail.com
*** The research is done on RFFI grants nos. 14-08-31612 mol_a, 15-08-00849.

Введение. На современном этапе развития производства отмечается все более активное использование полимерных композиционных материалов (ПКМ) в наукоемких отраслях — таких, как: авиастроение, кораблестроение, ракетно-космическая промышленность, автомобилестроение, энергетика, медицина и т. д. Как известно, выпуск компонентов ПКМ, а также соответствующих деталей и агрегатов предусматривают наличие в стране мощной научной и производственной базы. Значительный технологический и коммерческий потенциал ПКМ объясняется такими их свойствами, как:

— высокие удельные прочность, жесткость и модуль упругости;
— хорошая демпфирующая способность и коррозионная стойкость;
— усталостная прочность и низкий коэффициент теплового расширения.

Отличные прочностные характеристики и низкая удельная плотность композитов по сравнению с металлами позволяют уменьшить массу готовой детали без потери жесткости и надежности, а также получить изделия с заданными физико-механическими свойствами.

По данным National Aeronautics and Space Administration (NASA), в аэрокосмической отрасли чаще всего используются композиты на основе термореактивных смол — такие, как: стеклопластики на основе эпоксидных связующих: Hexcel F-161; GE-101; Ferro 2209; G-11; E-720; полиамид-стекловолокно; эпоксиорганопластик (с волокном «Кевлар-49») марки F-164; полиамид-кевлар Skybond 703; эпоксиуглепластик HY-E-134 и ряд других [1]. Следует отметить, что в наиболее нагруженных элементах конструкции чаще всего применяются комбинированные материалы — полимерные композиты, армированные металлом. В самолете Boeing 787 Dreamliner доля полимеров составляет порядка 50 %. В частности, фюзеляж полностью выполнен из композиционных материалов с использованием многослойных структур композит-металл, а средняя секция крыла — из пакетов алюминий-углепластик-алюминий [2].

В данной работе исследовался стеклопластик ВПС-7, армированный титановой фольгой и применяемый для изготовления лонжерона лопасти несущего винта (ЛНВ) вертолета Ми-28. Лонжерон изготавливается методом сухой спиральной намотки 12 слоев стеклолент на металлическую оправку с последующим отверждением в пресс-форме.

В комлевой части лонжерона с третьего по девятый слой устанавливают комбинированные пакеты усиления, состоящие из титановой фольги ОТ4-0-0,1×220 и кордножгутовой высокомодульной стеклоткани (рис. 1).

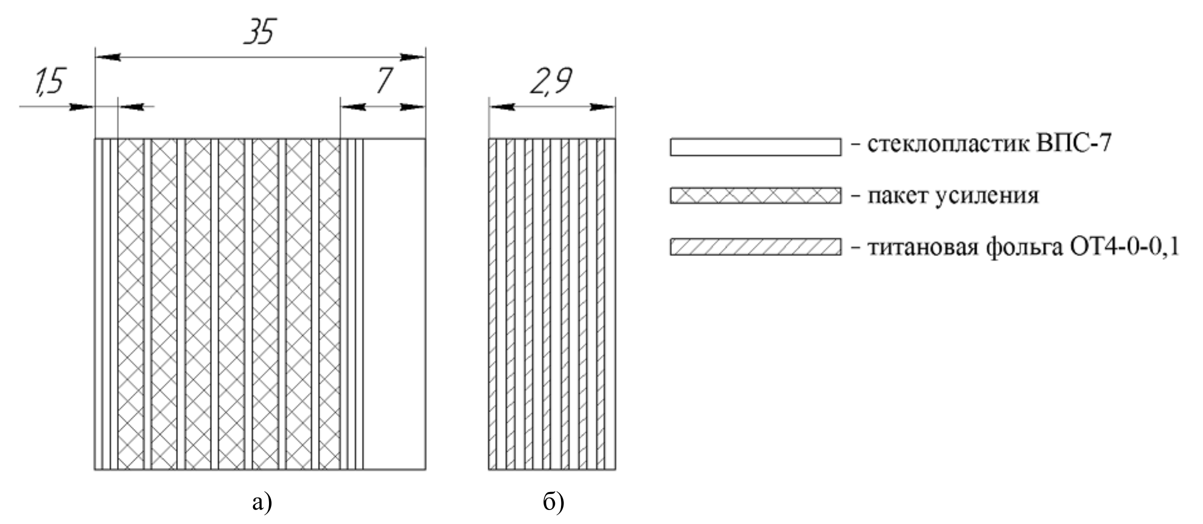


Рис. 1. Комбинированные пакеты усиления в комлевой части лонжерона: схема укладки пакетов (а); схема расположения слоев титана и стеклопластика в пакете (б)

Технологический процесс изготовления ЛНВ предусматривает получение посадочных отверстий Ø33H7 в комле лонжерона под втулку несущего винта. Маршрут обработки состоит из операций сверления, двух этапов рассверливания, расфрезеровывания, двух этапов зенкерования и трех этапов развертывания. Соотношение глубины сверления к диаметру сверла составляет 2:1. Несмотря на это, обработка ведется циклом глубокого сверления — вывод сверла из отверстия после врезания на каждые 2 мм. Данное технологическое решение и протяженный маршрут механообработки с большим числом переходов направлены на минимизацию таких дефектов как расслоения и прижоги. ЛНВ вертолета — особо ответственный узел, испытывающий большие динамические знакопеременные нагрузки и вибрации. К эксплуатационной надежности узла предъявляются высокие требования — наличие дефектов не допускается.

Проблемы обеспечения качества отверстий в полимерных композитах после операций сверления. Одной из важных задач изготовления изделий из ПКМ является получение соединений композит-металл и композит-композит с использованием крепежных элементов через отверстия, обработанные осевым инструментом. Трудность обеспечения качества и производительности механической обработки отверстий обусловлена тем, что жесткость инструмента ограничена размерами отверстия и осложнен отвод стружки из зоны резания. Композиты являются особой

группой анизотропных материалов со специфическими свойствами. Поэтому перенос закономерностей механической обработки металлов на полимеры не имеет успеха.

Сверление отверстий в слоистых армированных ПКМ сопровождается большим количеством технологических проблем, в числе которых невозможность использования смазочно-охлаждающей жидкости, усадка отверстий, повышенный износ режущего инструмента, сложность получения отверстий высокого качества ввиду низкой адгезионной связи наполнителя со связующими поверхностями [3]. Характерными дефектами, сопровождающими процесс сверления полимерных композитов, являются расслоения, разлохмачивания, сколы в местах входа (выхода) сверла, оплавления полимерной матрицы и появление прижогов на обработанных поверхностях [4–6].

Расслоения снижают усталостную прочность, прочность на сжатие, интенсифицируют влагопоглощение, снижая эксплуатационную надежность изделия. В работе [7] показано преобладание разлохмачиваний на входе в отверстие и расслоений на выходе. Авторы работ [8–11] отмечают, что на образование расслоений оказывают влияние режимы обработки, причем подача в большей степени, чем скорость резания. Увеличение подачи приводит к возрастанию силовых составляющих процесса резания, под действием которых происходит проминание не срезанных слоев композита.

В [12] описана обработка отверстия спиральными сверлами в двухслойном пакете углепластик-титан. Толщина слоя композита составляла 5 мм, титана — 4 мм. Автором отмечено скачкообразное возрастание осевой силы резания (до 400 %) при переходе режущей кромки сверла со слоя композита на слой металла.

Характеристика процесса сверления отверстий в полимерных композиционных материалах во многом определяется свойствами наполнителя. Имеющие высокую твердость и истирающую способность стекловолокна вызывают повышенный абразивный износ и округление режущих кромок. Износ увеличивает контактные силы трения по задней поверхности сверла, что влечет повышение температуры в зоне резания и образование расслоений. Отмечено преобладает абразивного износа над всеми остальными видами [3, 13].

В [13] выявлены только два этапа износа режущего инструмента: период приработки и период установившегося износа. Период катастрофического износа, характерный для металлов, отсутствует. Аналогичные выводы сделаны в работе [3], где автор предлагает использовать технологический критерий износа — инструмент сменяется, когда величина дефекта приближается к максимально допустимым значениям.

В работах [2, 12] применялись двух-, трехслойные пакеты композит-металл с достаточно большой толщиной слоев (более 5 мм). Полимер располагался либо между металлическими пластинами, либо сверху. При данной схеме армирования слои металла выполняют роли технологических подкладок, рекомендованных к использованию в работе [3] и обеспечивающих снижение расслоений.

Сверление отверстий в лонжероне ЛНВ наталкивается на специфические трудности. Слои титана и стеклопластика имеют малую толщину — 0,1 и 0,2 мм соответственно. Поэтому в процессе резания одновременно участвуют два различных материала с взаимно исключающими требованиями к обработке.

Операции обработки отверстий в композитах выполняются на заключительных этапах технологического цикла изделия — подготовка к сборке и сборка.

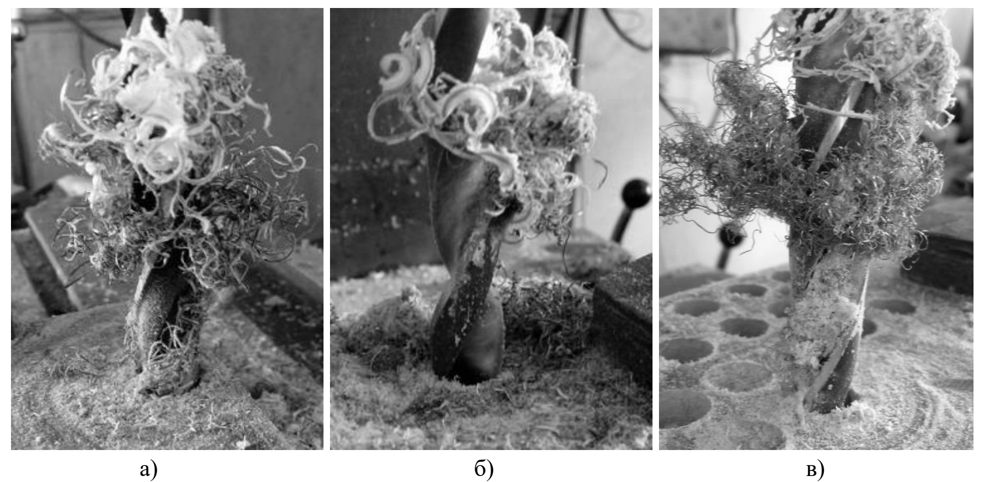
Значительное повышение себестоимости готовой продукции и технологии обработки обусловливается трудностями обеспечения качества отверстий в слоистых полимерных композитах — в частности, такими, как:

— необходимость занижения режимов обработки;
— использование большого числа переходов с целью минимизации дефектов;
— определенная вероятность брака дорогостоящих деталей;
— повышенный износ инструмента.

Анализ работ, посвященных обработке композитов с металлами, показал, что процессы сверления комбинированных многослойных стеклопластик-титановых композиций, практически не изучены. Таким образом, представляются актуальными исследования, направленные на повышение качества и производительности таких структур.

Экспериментальные исследования стружкообразования и качества обработанных отверстий. В экспериментах использовались сверла Ø15 мм из быстрорежущей стали Р6М5 с различной заточкой угла при вершине 2φ: стандартное спиральное ($2\varphi = 118^\circ$), сверло с двойной заточкой (СДЗ) 1-го типа ($2\varphi = 140^\circ$, $2\varphi_1 = 90^\circ$) и СДЗ 2-го типа ($2\varphi = 70^\circ$, $2\varphi_1 = 35^\circ$).

На рис. 2 представлены снимки стружкообразования при различных геометриях инструмента. Обработка велась на проход без использования смазочно-охлаждающей жидкости и цикла ввода (вывода) инструмента из зоны резания.



а) б) в)

Рис. 2. Характер образования стружки при сверлении (V = 7,5 м/мин, S = 0,2 мм/об): стандартным сверлом (а); СДЗ 1-го типа (б); СДЗ 2-го типа (в)

Наблюдения показывают, что в стружечных канавках стандартного сверла располагаются плотные пакеты стружки, тогда как у сверла с двойной заточкой 1-го типа пакетирование практически отсутствует. СДЗ 2-го типа показало промежуточный результат — пакетирование наблюдается на определенных режимах обработки. Двойная заточка 1-го типа позволяет увести стружечный слой от обработанной поверхности и направить ко дну стружечной канавки, увеличив вектор скорости в направлении к оси сверла, что облегчает ее транспортировку из зоны резания.

Расслоения при обработке стеклопластика имеют правильную форму, близкую к окружности. Поэтому величина расслоений определена как разница между максимальным поврежденным радиусом и номинальным радиусом отверстия. Измерения (табл. 1) выполнены с помощью микроскопа Бринелля.

Таблица 1

Величина расслоений в местах входа/выхода отверстия

Режимы обработки		Расслоения, мм					
V, м/мин	S, мм/об	Стандартное сверло		СДЗ 1-го типа		СДЗ 2-го типа	
		Вход	Выход	Вход	Выход	Вход	Выход
7,5	0,2	1,05 1,0 1,1	0,7 0,9 0,8	0,5 0,4 0,3	0,5 0,4 0,5	0,6 0,7 0,65	0,7 0,55 0,7
7,5	0,6	1,2 1,4 1,6	0,9 0,9 1,0	0,6 1,0 1,2	0,6 0,9 0,8	0,75 0,85 0,7	0,5 0,35 0,8
7,5	0,8	1,25 1,6 1,75	1,4 1,3 1,4	0,8 1,4 1,3	1,0 1,1 0,6	0,95 1,0 0,9	0,5 0,5 0,7
12	0,2	0,8 0,8 0,8	0,7 0,8 0,7	0,35 0,6 0,5	0,6 0,4 0,5	0,7 0,8 0,8	0,6 0,6 0,8
12	0,6	1,3 1,0 1,2	0,8 0,6 0,9	0,7 1,0 1,1	0,8 0,7 0,4	1,0 1,0 0,95	0,6 0,4 0,55
12	0,8	1,6 1,6 1,9	1,2 1,0 1,2	1,0 1,4 1,3	1,0 1,1 1,2	1,1 1,05 1,0	0,5 0,6 0,7
19	0,2	1,0 0,8 0,9	0,8 0,7 0,6	0,55 0,35 0,45	0,5 0,4 0,5	0,5 0,4 0,7	0,8 0,4 0,6
19	0,6	1,25 1,3 1,4	0,6 0,7 0,85	0,8 1,2 1,0	0,8 1,0 0,75	0,8 0,95 1,2	0,9 0,65 0,7
19	0,8	1,6 1,5 1,45	1,4 1,0 1,1	0,8 1,1 1,3	1,0 1,0 1,1	1,05 1,2 1,2	0,2 0,6 0,8

Анализ экспериментальных данных показал зависимость качества отверстий от характера стружкообразования. У СДЗ 1-го типа пакетирование стружки практически отсутствует, что обеспечивает снижение величины расслоений до 60 % в сравнении со стандартной геометрией и до 40 % в сравнении с заточкой 2-го типа. Из табл. можем видеть возрастание величины расслоений с возрастанием подачи, что подтверждено в работах [8–11]. Оптимальные режимы обработки армированного стеклопластика — V = 7,5 ÷ 12 м/мин, S = 0,2 мм/об. Увеличение скорости резания до 19 м/мин вызывает образование прижогов на обрабатываемой поверхности.

Экспериментальное исследование виброактивности процесса сверления. Для контроля величины крутящего момента и его вывода на экран ЭВМ было спроектировано и изготовлено устройство регистрации и записи, работающее следующим образом. После проведения калибровки прибора образец закрепляется в ложементе, соединенном с плитой основания через подшипник качения. После начала сверления под действием крутящего момента ложемент с образцом начинают колебаться вокруг вертикальной оси и упруго деформировать закрепленную в основании балку с расположенными на ней тензометрическими датчиками, преобразующими упругие деформации балки в электрический сигнал. Сигнал через предварительный усилитель ZET411 поступает на аналогово-цифровой преобразователь ZET210 и выводится на экран ЭВМ в виде цифровой и графической (рис. 3) информации.

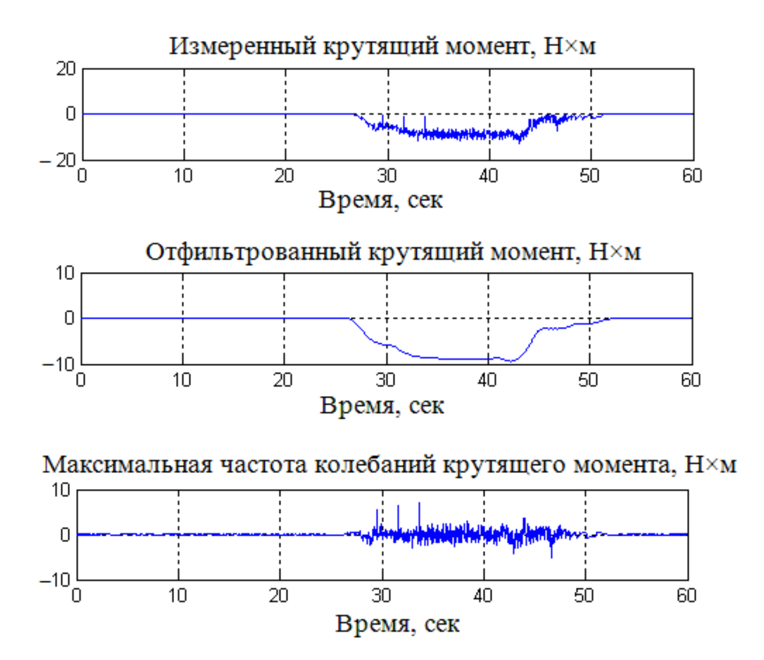


Рис. 3. Измеренные колебания крутящего момента в процессе резания

Обработка данных виброактивности процесса сверления. Чтобы исключить из рассмотрения холостой ход, по диаграмме определяются моменты начала врезания и выхода сверла. После ввода этих данных спектральному анализу подвергается только часть реализации, соответствующая процессу резания.

Спектральный анализ вибраций выполнен средствами программного модуля Welch spectral estimator с уровнем доверительной вероятности 0,95 в среде MATLAB [14]. Расположение пиков на оси частот соответствовало нескольким первым гармоникам возбуждающего сигнала, частота которого была равна частоте вращения шпинделя, а мощность пиков характеризовала интенсивность колебаний технологической системы на каждой из частот спектра. Фильтрация данных проведена с помощью полиномиального сглаживающего фильтра Савицкого — Голея, заданного функцией sgolayfilt. Данный фильтр осуществляет полиномиальную аппроксимацию отдельных кадров входного сигнала по критерию минимума квадратичной ошибки, что применяется для «сглаживания» зашумленных сигналов с широким спектром.

После получения двух спектральных линий производится раскрытие структуры hpsd, в которой содержатся значения частоты и два столбца интенсивностей спектральных линий.

Каждый столбец интенсивностей вместе со столбцом частот рассматривается как функция, заданная таблично. Чтобы определить расположение пиков на частотной оси, производится последовательный просмотр значений интенсивности вибраций, и найденная экстремальная точка определяется как пик. Для более точного определения резонансной частоты каждого пика его вершина аппроксимируется многочленом второго порядка, и для него вычисляются положение экстремума и само экстремальное значение.

Когда найдены все пики, определяются их границы на уровне 0,707 для последующего вычисления полосы пропускания, добротности Q и интегральной мощности пика внутри этих границ (рис. 4).

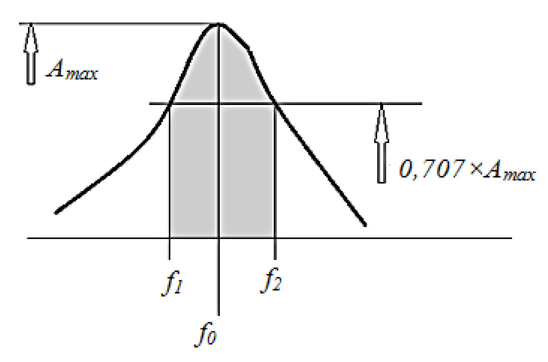


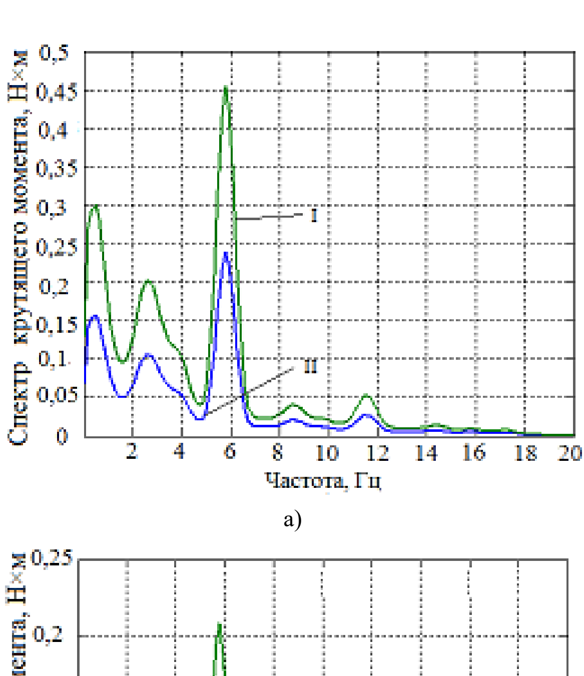
Рис. 4. Определение интегральной мощности пика

Затемненная область под графиком колебаний представляет собой интегральную мощность пика. Добротность Q может быть вычислена по формуле

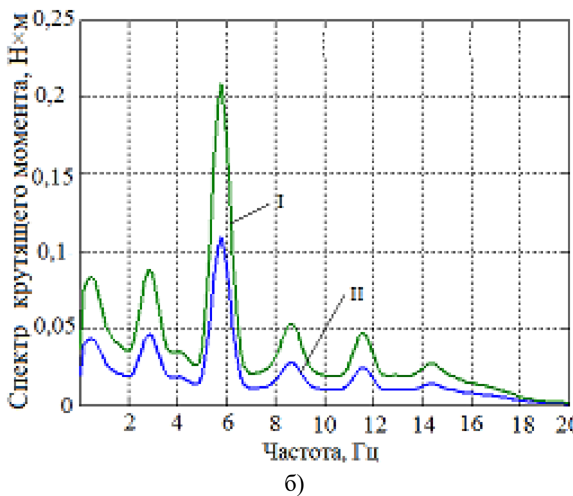
$$Q = \frac{f_0}{\Delta f},$$

где f_0 — резонансная частота; $\Delta f = f_1 - f_2$ — ширина полосы.

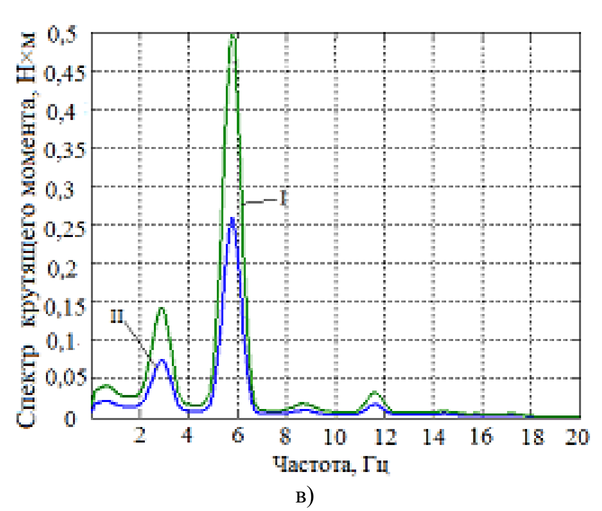
С помощью отслеживания амплитуды и частоты колебаний крутящего момента осуществлялся поиск оптимальных режимов обработки и конструктивно-геометрических параметров инструмента. На рис. 5 представлены спектральные линии крутящего момента с уровнем доверительной вероятности 0,95, где кривые I и II — верхний и нижний уровень соответственно.



а)



б)



в)

Рис. 5. Спектральный анализ колебаний крутящего момента: стандартное сверло (а);
СДЗ 1-го типа (б); СДЗ 2-го типа (в)

Результаты вибрационного мониторинга показали, что амплитуда колебаний у СДЗ 1-го типа в 1,5–2 раза ниже в сравнении с СДЗ 2-го типа и стандартным, что говорит о более стабильном процессе резания. Данный факт полностью подтверждается значительным снижением пакетирования и величины расслоений.

Выводы. Для исключения дефектов сверления слоистых композитов металл-стеклопластик были исследованы 3 типа сверл, различающихся конструктивно-геометрическими параметрами режущей части.

Сверло с двойной заточкой 1-го типа показало лучшие результаты с точки зрения виброактивности процесса сверления: амплитуда колебаний крутящего момента ниже в сравнении с заточкой 2-го типа и стандартным сверлом на 40–50 %. В связи с этим процесс резания более стабилен, происходит качественное улучшение стружкообразования — пакетирование практически отсутствует. Улучшенный отвод стружки позволяет снизить величину расслоений на 60 % в сравнении со стандартным сверлом и на 40 % в сравнении с заточкой 2-го типа. Применение модифицированной геометрии режущей части инструмента позволяет отказаться от цикла глубокого сверления без потери качества и таким образом добиться снижения машинного времени предварительной обработки посадочных отверстий в комле лонжерона с 6 минут до 1,5 минуты.

Библиографический список

1. Буланов, И. М. Технология ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов : учебник для вузов / И. М. Буланов, В. В. Воробей. — Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 1998. — 516 с.

2. 787. It Reinvents Fleet Plans and Transforms Business Plans [Электронный ресурс] / Boeing. — Режим доступа: http://www.boeing.com/boeing/commercial/787family/background.html (дата обращения: 21.01.2016).

3. Степанов, А. А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов / А. А. Степанов. — Ленинград : Машиностроение, 1987. — 175 с.

4. Experimental analysis of drilling damage in carbon-fiber reinforced thermoplastic laminates manufactured by resin transfer molding / A. Lopez-Arraiza [et al.] // Journal of Composite Materials. — 2012. — № 46 (6). — P. 717–725.

5. Drilling analysis of woven glass fiber-reinforced epoxy composites / U. A. Khashaba [et al.] // Journal of Composite Materials. — 2013. — № 47 (2). — P. 191–205.

6. Effects of Drilling Parameters on Delamination of Glass-Epoxy Composites / F. A. Ghasemi [et al.] // Australian Journal of Basic and Applied Sciences. — 2011. — № 5 (12). — P. 1433–1440.

7. Kilickap, E. Investigation into the effect of drilling parameters on delamination in drilling GFRP / E. Kilickap // Journal of Reinforced Plastics and Composites. — 2010. — № 29 (23). — P. 3498–3503.

8. Study on the Derivation of Parametric Cutting Force Equations in Drilling of GFRP Composites / E. Okutan [et al.] // Journal of Mechanical Engineering. — 2013. — Vol. 59 (2). — P. 97–105.

9. Murugesh, M.-C. Influence of filler material on Glass fiber/ epoxy composite laminates during drilling / M-C. Murugesh, K. Sadashivappa // International Journal of Advances in Engineering & Technology. — 2012. — Vol. 3, iss. 1. — P. 233–239.

10. Comparative analysis of drills for composite laminates / L.-M. Durao [et al.] // Journal of Composite Materials. — 2011. — № 46 (14). — P. 1649–1659.

11. A study aimed at minimizing delamination during drilling of CFRP composites / V.-N. Gaitonde [et al.] // Journal of Composite Materials. — 2011. — № 45 (22). — P. 2359–2368.

12. Mechanism of damage generation during drilling of carbon/epoxy composites and titanium alloy stacks / B. Wang [et al.] // Engineering Manufacture. — 2014. — Vol. 228, iss. 7. — P. 698–706.

13. Isbilir, O. Delamination and wear in drilling of carbon-fiber reinforced plastic composites using multilayer TiAlN/TiN PVD-coated tungsten carbide tools / O. Isbilir, E. Ghassemieh // Journal of Reinforced Plastics and Composites. — 2012. — № 31 (10). — P. 717–727.

14. Дьяконов, В. П. MATLAB 6.5/7.0 + Simulink 5/6. Обработка сигналов и проектирование фильтров / В. П. Дьяконов. — Москва : Солон-пресс, 2005. —576 с.

References

1. Bulanov, I.M., Vorobey, V.V. Tekhnologiya raketnykh i aerokosmicheskikh konstruktsiy iz kompozitsionnykh materialov: uchebnik dlya vuzov. [Rocket and aerospace composite structures technology.] Moscow: Izd-vo MGTU im. N.E. Baumana, 1998, 516 p. (in Russian).

2. 787. It Reinvents Fleet Plans and Transforms Business Plans. Boeing. Available at: http://www.boeing.com/boeing/commercial/787family/background.html (accessed: 21.01.2016).

3. Stepanov, A.A. Obrabotka rezaniem vysokoprochnykh kompozitsionnykh polimernykh materialov. [Machining of high-strength composite polymer materials.] Leningrad: Mashinostroenie, 1987, 175 p. (in Russian).

4. Lopez-Arraiza, A., et al. Experimental analysis of drilling damage in carbon-fiber reinforced thermoplastic laminates manufactured by resin transfer molding. Journal of Composite Materials, 2012, vol. 46, iss. 6, pp. 717–725.

5. Khashaba, U.A., et al. Drilling analysis of woven glass fiber-reinforced/ epoxy composites. Journal of Composite Materials, 2013, vol. 47, iss. 2, pp. 191–205.

6. Ghasemi, F.A., et al. Effects of Drilling Parameters on Delamination of Glass-Epoxy Composites. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 2011, vol. 5, iss. 12, pp. 1433–1440.

7. Kilickap, E. Investigation into the effect of drilling parameters on delamination in drilling GFRP. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2010, vol. 29 (23), pp. 3498–3503.

8. Okutan, E., et al. Study on the Derivation of Parametric Cutting Force Equations in Drilling of GFRP Composites. Journal of Mechanical Engineering, 2013, vol. 59 no. 2, pp. 97–105.

9. Murugesh, M.-C., Sadashivappa, K. Influence of filler material on Glass fiber/ epoxy composite laminates during drilling. International Journal of Advances in Engineering & Technology, 2012, vol. 3, iss. 1, pp. 233–239.

10. Durao, L.-M., et al. Comparative analysis of drills for composite laminates. Journal of Composite Materials, 2011, vol. 46 (14), pp. 1649–1659.

11. Gaitonde, V.-N., et al. A study aimed at minimizing delamination during drilling of CFRP composites. Journal of Composite Materials, 2011, vol. 45 (22), pp. 2359–2368.

12. Wang, B., et al. Mechanism of damage generation during drilling of carbon/epoxy composites and titanium alloy stacks. Engineering Manufacture, 2014, vol. 228, iss. 7, pp. 698–706.

13. Isbilir, O., Ghassemieh, E. Delamination and wear in drilling of carbon-fiber reinforced plastic composites using multilayer TiAlN/TiN PVD-coated tungsten carbide tools. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2012, vol. 31 (10), pp. 717–727.

14. Dyakonov, V.P. MATLAB 6.5/7.0 + Simulink 5/6. Obrabotka signalov i proektirovanie fil'trov. [Signal processing and filter designing.] Moscow: Solon-press, 2005, 576 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 27.07.2015
Сдана в редакцию 28.07.2015
Запланирована в номер 22.01.2016

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 628.517.625.08 DOI 10.12737/18274

Экспериментальные исследования коэффициентов потерь энергии колебаний узлов колесных пар[*]

В. А. Бондаренко[1], С. Ф. Подуст[2]**
[1] Ростовский государственный университет путей сообщения, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация
[2] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Experimental study on energy dissipation factors of wheelset node oscillations [***]

V. A. Bondarenko[1], S. F. Podust[2]**
[1]Rostov State Transport University, Rostov-on-Don, Russian Federation
[2]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Колесные пары, непосредственно воспринимающие силовое воздействие от взаимодействия колес с рельсами, являются интенсивными источниками шума при движении транспортных средств, например, мостовых кранов и железнодорожного подвижного состава. Несмотря на различия конструктивного исполнения и функционального назначения, расчет виброакустических характеристик может быть выполнен с единых позиций. Следует отметить, что точность расчета уровней звукового давления и вибраций в значительной степени определяется точностью задания частотно-зависимых коэффициентов потерь колебательной энергии. Теоретические исследования этой физико-механической величины представляет значительные трудности. Поэтому для инженерных расчетов уровней звукового давления и вибраций целесообразно использовать регрессионные зависимости, полученные на основе математической обработки экспериментальных величин коэффициентов потерь узла колесной пары и аппроксимация зависимостей степенными полиномами различных степеней.

Ключевые слова: коэффициенты потерь, энергия колебаний, колесные пары.

Wheelsets directly subjected to a force impact under the interaction of wheels and rails are intense noisemakers when moving, including overhead cranes and railway rolling stock. Despite the design and functional differences, the calculation of vibroacoustic characteristics can be made from the unified positions. It should be noted that the calculation accuracy of the sound pressure levels and vibrations is in large part determined by the precision of setting the frequency-dependent loss factors of the vibration energy. Theoretical studies of this physical and mechanical value are rather complicated. Therefore, the regression curves obtained on the basis of the mathematical treatment of the experimental coefficient values of the wheelset assembly losses and the approximation dependencies by the exponential polynomials of various degrees should be used for the engineering analysis of the sound pressure levels and vibrations.

Keywords: loss ratios, vibration energy, wheelsets.

Введение. Исследованию шума и вибрации подвижного состава посвящены работы [1—11]. Расчет вибраций узлов колесных пар технологических машин различного функционального назначения (электровозы, тепловозы, мостовые краны и т. д.) основан на использовании методов энергетического баланса [12]. Для этого необходимо знать значения коэффициентов потерь колебательной энергии, являющимися частотно-зависимыми величинами. В лабораторных условиях проводилась серия экспериментов по определению коэффициентов потерь колебательной энергии узлов колесных пар. Схемы установки данных узлов представлены на рис. 1. Колесная пара устанавливалась в центрах на массивной плите.

[*] Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
[**] E-mail: bva_rek@rgups.ru
[***] The research is done within the frame of the independent R&D.

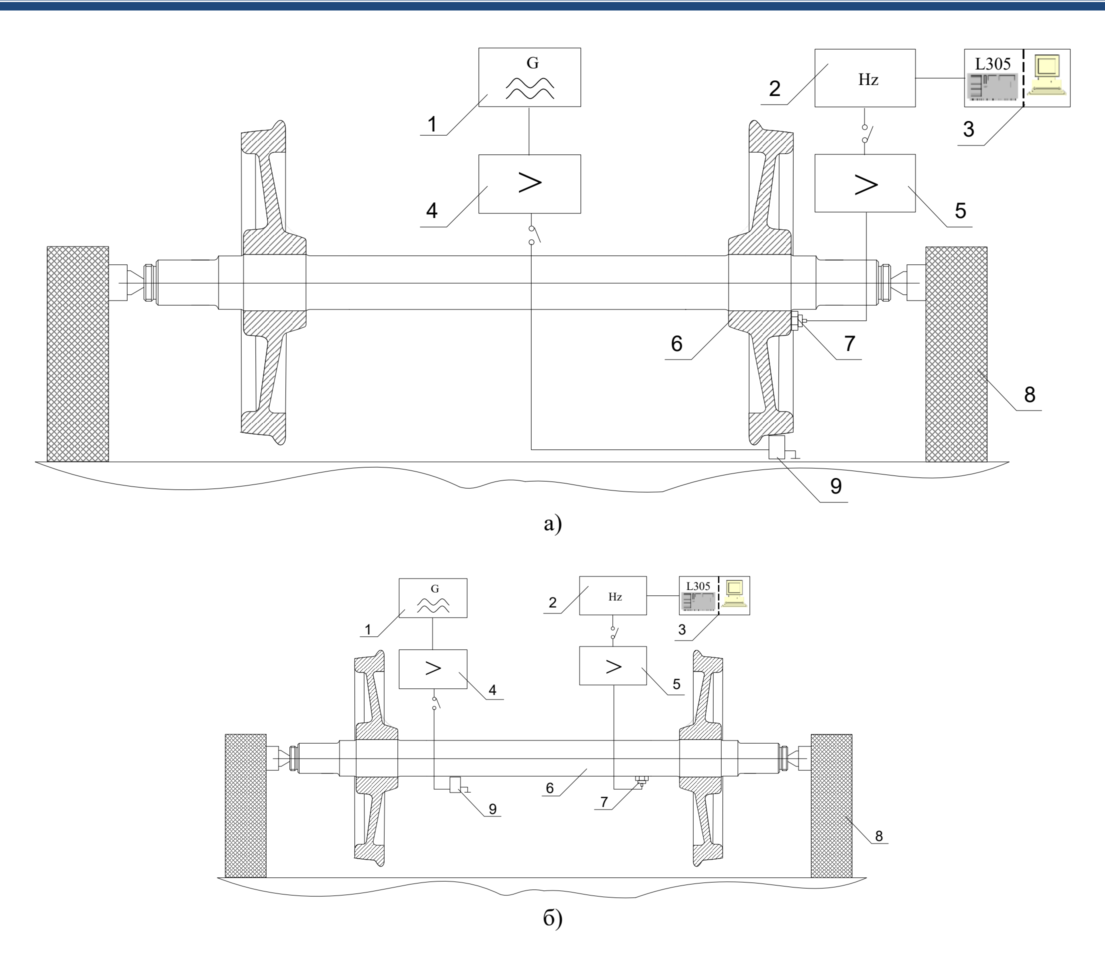


Рис. 1. Схема установки для определения коэффициентов потерь колебательной энергии колесной пары:
а) колеса; б) оси колесной пары:
1 — генератор сигналов возбуждения; 2 — анализатор; 3 — вычислительный комплекс; 4 и 5 — усилители сигналов;
6 — исследуемый элемент; 7 — вибродатчик; 8 — виброизолирующие стойки; 9 — возбудитель колебаний

Результаты измерений, представленные на рис. 2, показали, что при общей закономерности характера частотно-зависимых коэффициентов потерь колебательной энергии их величины для узлов колесных пар существенно отличаются от известных данных для пластинчато-стержневых конструкций [13]. Поэтому полученные результаты представляют собой интерес для расчетов спектров вибрации и шума основных звукоизлучающих элементов общей акустической системы узлов колесных пар.

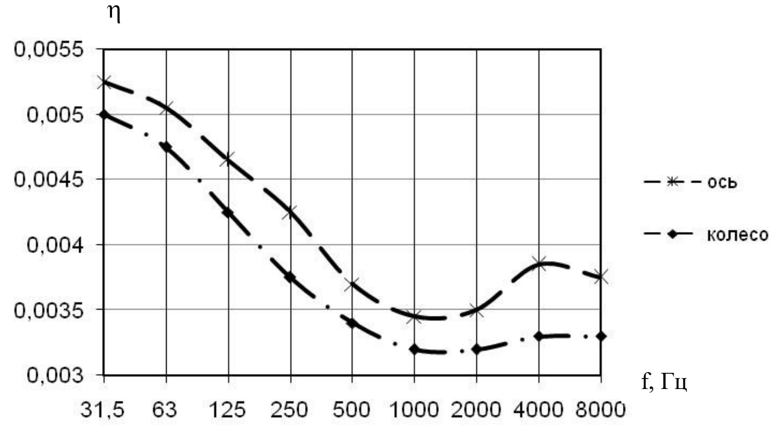


Рис. 2. Коэффициенты потерь колебательной энергии узлов колесных пар и режущего инструмента

Для обоснования рациональных параметров конструкции системы шумозащиты рассчитывался количественный вклад основных источников шума (обрабатываемых колес, оси колесной пары) в формирование спектров шума в рабочей зоне оператора. Как показали теоретические исследования, точность расчета уровней звукового давления составляющих спектра в значительной мере зависит от величин частотно-зависимых коэффициентов потерь колебатель-

ной энергии. Для этих целей по экспериментальным данным, приведенным на рис. 3, получены регрессионные зависимости коэффициентов потерь колебательной энергии колес, оси колесных пар.

Регрессионный анализ позволяет аппроксимировать кривые, построенные по экспериментальным данным, или таблично заданные функции методом наименьших квадратов. Метод наименьших квадратов позволяет получить наиболее точные значения параметров эмпирической зависимости и, в соответствии с этим, максимально приблизить теоретические результаты расчетов к фактическим.

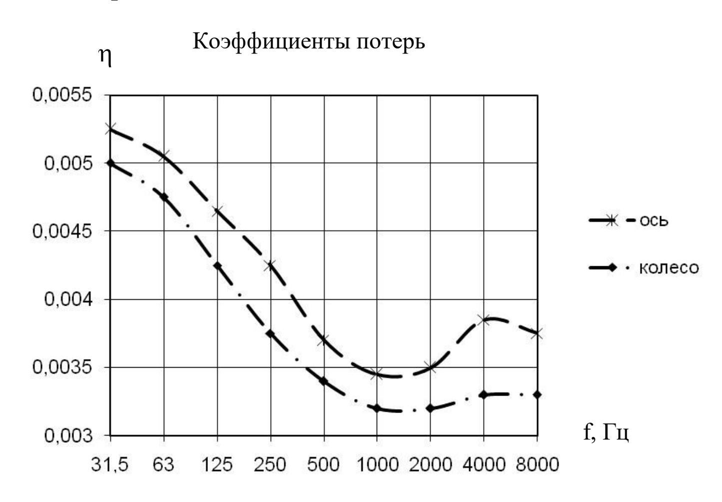


Рис. 3. Частотная зависимость коэффициентов потерь колебательной энергии

Как правило, этот метод используется для нахождения линейной зависимости. Однако, метод наименьших квадратов и процедура подбора прямой регрессии полностью переносятся и на случай нахождения криволинейной зависимости при условии, когда уравнение кривой может быть после некоторых преобразований сведено к линейному тренду. В практике криволинейного выравнивания широко распространены два вида преобразований: натуральный логарифм (ln) и обратное преобразование (1/x). При этом возможно преобразование как зависимой переменной y, так и независимой x или одновременно и той, и другой (Таблица 1).

Таблица 1

Кривые, сводящиеся к уравнению прямой преобразованием исходных данных

Название кривой	Уравнение	Преобразование
Экспоненциальная	$y = a_0 e^{a_1 x}$	$Y = \ln y$
Степенная	$y = a_0 x^{\omega}$	$Y = \ln y$ $X = \ln x$
Гиперболическая I типа	$y = a_0 + \frac{a_1}{x}$	$X = \frac{1}{x}$
Гиперболическая II типа	$y = \frac{1}{a_0 + a_1 x}$	$Y = \frac{1}{y}$
Гиперболическая III типа	$y = \frac{x}{a_0 + a_1 x}$	$Y = \frac{1}{y}$ $X = \frac{1}{x}$
Логарифмическая	$y = a_0 + a_1 \ln x$	$X = \ln x$
S-образная	$y = e^{a_0 + \frac{a_1}{x}}$	$Y = \ln y$ $X = \frac{1}{x}$
Обратнологарифмическая	$y = \frac{1}{a_0 + a_1 \ln x}$	$Y = \frac{1}{y}$ $X = \ln x$

Кроме этого, метод наименьших квадратов позволяет определить эмпирическую зависимость и в виде полинома (многочлена) любой степени т. При выборе наилучшей кривой оценивается такой параметр, как среднеквадратичное отклонение (СКО), который показывает степень приближения эмпирической кривой к исходной и поэтому должен быть минимальным:

$$\sigma_m = \sqrt{\frac{1}{n-m}\sum_{i=0}^{n}\left(P_m(x_i)-y_i\right)^2}, \qquad (1)$$

где n — количество исходных данных; т — степень аппроксимирующего полинома; $P_т(x_i)$ — значение эмпирической функции; y_i — значение исходной функции.

Так как многочлен $P_m(x)=a_0+a_1x+a_2x^2+\ldots+a_mx^m$ определяется своими коэффициентами, то фактически нужно подобрать набор коэффициентов $a_0, a_1,\ldots,a_m$, минимизирующий функцию

$$\Phi(a_0, a_1\ldots,a_m)=\sum_{i=0}^{n}\left(P_m(x_i)-y_i\right)^2=\sum_{i=0}^{n}\left(\sum_{j=0}^{m}a_ix_i^j-y_i\right)^2. \qquad (2)$$

Используя необходимое условие экстремума $\frac{\partial\Phi}{\partial a_k}=0, k=0,1,\ldots,m$ получаем нормальную систему метода наименьших квадратов:

$$\sum_{j=0}^{m}\left(\sum_{i=0}^{n}x_i^{j+k}\right)a_j=\sum_{i=0}^{n}y_ix_i^k,\ k=0,1,..m. \qquad (3)$$

Полученная система есть система алгебраических уравнений относительно неизвестных a_1, a_2,…,a_m, решение которой даст коэффициенты эмпирических зависимостей.

При аппроксимации таблично заданной функции полиномом его степень заранее неизвестна, поэтому возникает проблема выбора оптимальной степени аппроксимирующего многочлена. Вычислим для каждого полинома величину $[a_1]_m$. За оптимальное значение степени полинома предлагается принять то значение т, начиная с которого величина a_m стабилизируется или начинает возрастать.

Для определения аналитических зависимостей коэффициентов потерь от частоты необходимо аппроксимировать каждую кривую отдельно. Проведем расчет коэффициентов уравнений регрессии для всех вышеперечисленных функций последовательно для оси колесной пары и колеса.

Ось колесной пары. Исходные данные коэффициента потерь колебательной энергии оси колесной пары представлены на рис. 3. Регрессионный анализ проводим аналогично фрезе, результаты сводим в табл. 2, а также представляем на рис. 4, 5.

Таблица 2

Зависимости коэффициента потерь колебательной энергии для оси колесной пары

Название кривой	Уравнение	СКО
Экспоненциальная	$\eta=4{,}3\cdot10^{-3}e^{-2{,}7\cdot10^{-5}f}$	5,971E–04
Степенная	$\eta=0{,}0064f^{-0{,}071}$	3,218E–04
Гиперболическая I типа	$\eta=0{,}0038+\frac{0{,}057}{f}$	3,086E–04
Гиперболическая II типа	$\eta=\frac{1}{234{,}79+0{,}0061f}$	6,007E–04
Гиперболическая III типа	$\eta=\frac{f}{-2982{,}62+266{,}72f}$	3,814E–04
Логарифмическая	$\eta=0{,}0061-0{,}00031\cdot\ln(f)$	3,461E–04
S-образная	$\eta=e^{-5{,}58+\frac{12{,}93}{f}}$	3,389E–04
Обратнологарифмическая	$\eta=\frac{1}{143{,}07+16{,}51\cdot\ln(f)}$	3,066E–04

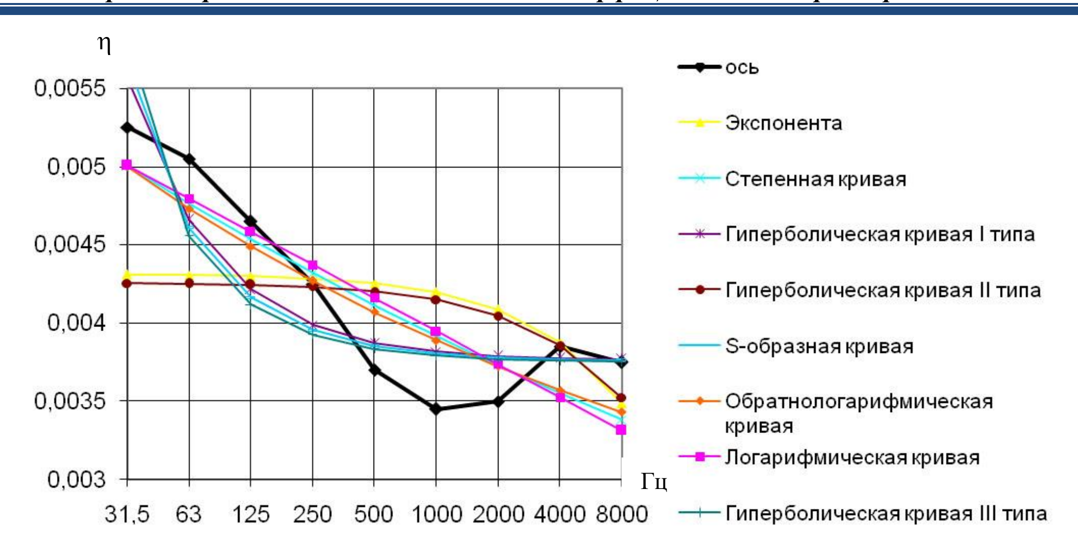


Рис. 4. Графики коэффициента потерь колебательной энергии оси колесной пары и аппроксимирующих кривых

Таблица 3

Аппроксимация коэффициента потерь колебательной энергии для оси колесной пары полиномами различных степеней

Степень полинома	Уравнение	СКО (a_m)
1	$\eta = 0{,}006 - 0{,}0007 \cdot \lg f$	3,70E–04
2	$\eta = 0{,}01 - 0{,}004(\lg f) + 0{,}0005(\lg f)^2$	2,04E–04
3	$\eta = 0{,}005 + 0{,}003(\lg f) - 0{,}0018(\lg f)^2 + 0{,}00029(\lg f)^3$	1,78E–04
4	$\eta = -0{,}18 + 0{,}04(\lg f) - 0{,}024(\lg f)^2 + 0{,}006(\lg f)^3 - 0{,}0005(\lg f)^4$	1,13E–04
5	$\eta = 0{,}047 - 0{,}095(\lg f) + 0{,}084(\lg f)^2 - 0{,}036(\lg f)^3 + 0{,}008(\lg f)^4 - 0{,}0006(\lg f)^5$	4,66E–05
6	$\eta = -0{,}035 + 0{,}108(\lg f) - 0{,}121(\lg f)^2 + 0{,}072(\lg f)^3 - 0{,}024(\lg f)^4 + 0{,}004(\lg f)^5 - 0{,}0003(\lg f)^6$	4,36E–05
7	$\eta = -0{,}301 + 0{,}875(\lg f) - 1{,}051(\lg f)^2 + 0{,}686(\lg f)^3 - 0{,}263(\lg f)^4 + 0{,}059(\lg f)^5 - 0{,}007(\lg f)^6 + 0{,}0004(\lg f)^7$	5,65E–05

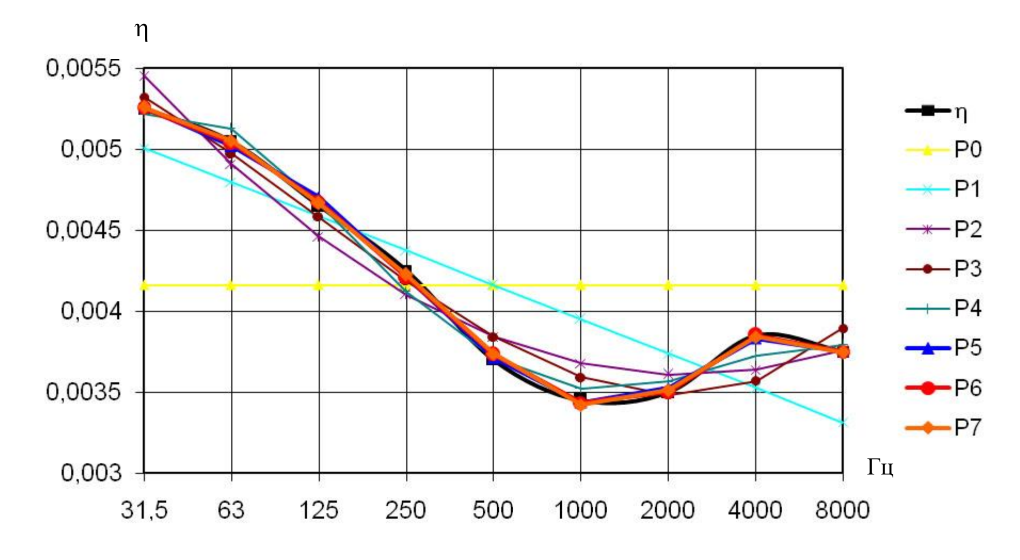


Рис. 5. Результаты аппроксимации коэффициента потерь оси колесной пары полиномами

Для коэффициента потерь колебательной энергии оси колесной пары по значениям СКО наиболее приближенным является полином шестой степени:

$$\eta = -0{,}035 + 0{,}108(\lg f) - 0{,}121(\lg f)^2 + 0{,}072(\lg f)^3 - 0{,}024(\lg f)^4 + 0{,}004(\lg f)^5 - 0{,}0003(\lg f)^6. \quad (4)$$

Колесо. Исходные данные коэффициента потерь колебательной энергии колеса представлены на рис. 3. Регрессионный анализ проводим аналогичным образом, результаты сводим в табл. 4 и 5, а также представляем на рис. 6, 7.

Таблица 4

Зависимости коэффициента потерь колебательной энергии для колеса

Название кривой	Уравнение	СКО
Экспоненциальная	$\eta = 3{,}98 \cdot 10^{-3} e^{-3{,}5 \cdot 10^{-5} f}$	5,942E-04
Степенная	$\eta = 0{,}0063 f^{-0{,}084}$	2,733E-04
Гиперболическая I типа	$\eta = 0{,}0034 + \frac{0{,}061}{f}$	2,623E-04
Гиперболическая II типа	$\eta = \frac{1}{254{,}94 + 0{,}009 f}$	5,972E-04
Гиперболическая III типа	$\eta = \frac{f}{-3775{,}23 + 297{,}49 f}$	3,671E-04
Логарифмическая	$\eta = 0{,}0059 - 0{,}00033 \cdot \ln(f)$	3,074E-04
S-образная	$\eta = e^{-5{,}695 + \frac{15{,}11}{f}}$	3,059E-04
Обратнологарифмическая	$\eta = \frac{1}{137{,}71 + 21{,}42 \cdot \ln(f)}$	2,511E-04

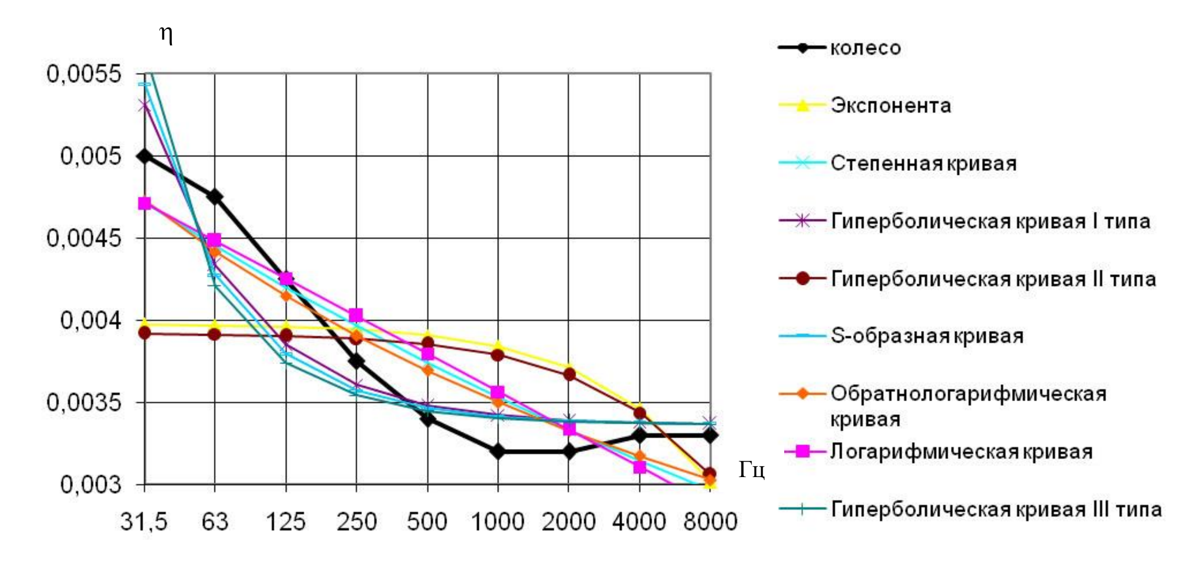


Рис. 6. Графики коэффициента потерь колебательной энергии колеса и аппроксимирующих кривых

Таблица 5

Аппроксимация коэффициента потерь колебательной энергии для колеса полиномами различных степеней

Степень полинома	Уравнение	СКО
1	$\eta = 0{,}006 - 0{,}0008 \cdot \lg f$	3,29E-04
2	$\eta = 0{,}009 - 0{,}004(\lg f) + 0{,}0005(\lg f)^2$	1,20E-04
3	$\eta = 0{,}007 + 0{,}0004(\lg f) - 0{,}0007(\lg f)^2 + 0{,}0002(\lg f)^3$	1,11E-04
4	$\eta = -0{,}01 + 0{,}028(\lg f) - 0{,}017(\lg f)^2 + 0{,}004(\lg f)^3 - 0{,}0004(\lg f)^4$	1,14E-05

5	$\eta = -0{,}011 + 0{,}029(\lg f) - 0{,}019(\lg f)^2 + 0{,}005(\lg f)^3 - 0{,}0005(\lg f)^4 + 0{,}00001(\lg f)^5$	1,31E-05
6	$\eta = -0{,}042 + 0{,}106(\lg f) - 0{,}096(\lg f)^2 + 0{,}046(\lg f)^3 - 0{,}012(\lg f)^4 + 0{,}002(\lg f)^5 - 0{,}0001(\lg f)^6$	7,88E-06
7	$\eta = -0{,}052 + 0{,}136(\lg f) - 0{,}133(\lg f)^2 + 0{,}07(\lg f)^3 - 0{,}022(\lg f)^4 + 0{,}004(\lg f)^5 - 0{,}0004(\lg f)^6 + 0{,}00001(\lg f)^7$	1,54E-05

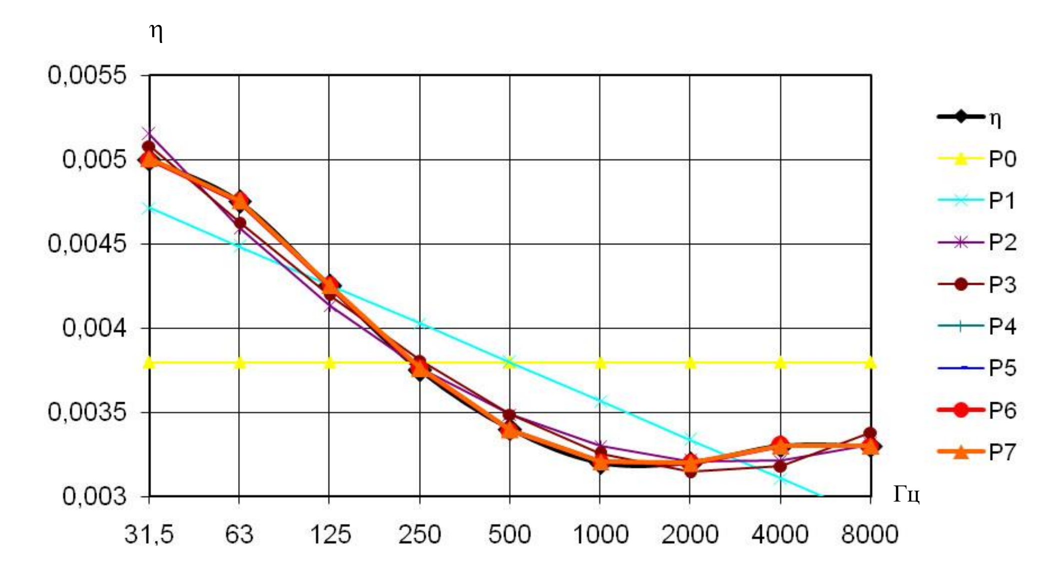


Рис. 7. Результаты аппроксимации коэффициента потерь колеса полиномами

Для коэффициента потерь колебательной энергии колеса по значениям СКО наиболее приближенным является полином шестой степени:

$$\eta = -0{,}042 + 0{,}106(\lg f) - 0{,}096(\lg f)^2 + 0{,}046(\lg f)^3 - 0{,}012(\lg f)^4 + 0{,}002(\lg f)^5 - 0{,}0001(\lg f)^6 \quad (5)$$

Расчетные спектры шума представлены на рис. 8.

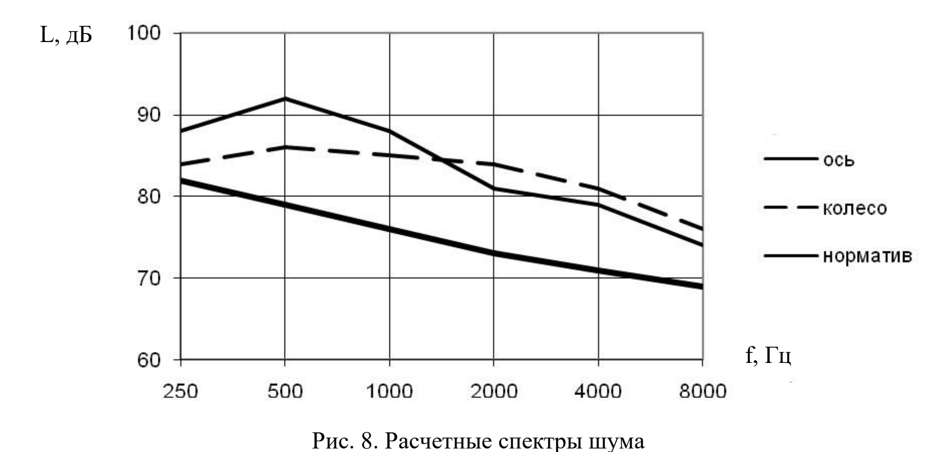


Рис. 8. Расчетные спектры шума

Выводы. Излучение звука колес в широком частотном диапазоне 500–8000 Гц превышает санитарные нормы на 3–10 дБ. В седьмой, восьмой и девятой октавах превышение санитарных норм уровня звукового давления составляет 8–10 дБ, что на 2–3 дБ больше, чем в случае оси колесной пары. Разница расчетных и экспериментальных данных по величинам превышения уровней звукового давления над предельно допустимыми значениями составляет 2–2,5 дБ, что является вполне приемлемым для технических расчетов уровней шума и вибрации.

Библиографический список

1. Van Beek, A. [et al.]. State of the art: Technical Report. — SNCF, 2002. — P.78.

2. Подуст, С. Ф. Спектральный состав шума в кабинах локомотивов / С. Ф. Подуст, Ю. В. Пронников // Тр. междунар. науч.-практ. конф. «Транспорт-2013». Рост. гос. ун-т путей сообщения. Ростов-на-Дону, 2013. Ч. 2. — С. 215–216.

3. Подуст, С. Ф. Анализ закономерностей шумообразования электропоездов / Вестник Рост. гос. ун-т путей сообщения. 2012. — №4 (48). — С. 42–45.

4. Подуст, С. Ф. Моделирование виброакустической динамики рельса на шпалах / Подуст С. Ф., Куклин Д. А.// Вестник Дон. гос. тех. ун-та. — 2013. — Т. 13, №1–2 (70–71). — С. 106–111.

5. Подуст, С. Ф. Моделирование виброакустической динамики шпал при движении подвижного состава / Вестник Рост. гос. ун-т путей сообщения. — 2013. — № 1(49). — С. 50–54.

6. Подуст, С. Ф. Экспериментальные исследования шума и вибрации грузовых поездов / С.Ф. Подуст // IX Промышленный конгресс юга России: сб. статей (11–13 сентября 2013 г., г. Ростов-на-Дону). — Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2013. — 776 с. — С. 212–214.

7. Подуст, С. Ф. Экспериментальные исследования диссипативной функции элементов остекления электровозов / С. Ф. Подуст, Ю. В. Пронников // IX Промышленный конгресс юга России: сб. статей (11–13 сентября 2013 г., г. Ростов-на-Дону). — Ростов-на-Дону: Изд. центр ДГТУ, 2013. — 776 с. — С. 215–221.

8. Пронников, Ю. В. Моделирование структурной составляющей шума в кабинах машинистов подвижного состава / Ю. В. Пронников // Вестник Рост. гос. ун-т путей сообщения. — 2010. — №3(39). — С. 64–68.

9. Колесников, И. В. [и др.]. Основы акустического проектирования кабин машинистов (теория и практика) / И. В. Колесников, Ю. В. Пронников, А. Н. Чукарин // — Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2012. — 120 с.

10. Подуст, С. Ф. Основы виброакустических расчетов отечественных электровозов. Монография / С. Ф. Подуст, А. Н. Чукарин, И. В. Богуславский. — Ростов-на-Дону: Издательский центр ДГТУ, 2013. — 160 с.

11. Колесников, И. В. Способы снижения шума и вибраций при проектировании, производстве и эксплуатации железнодорожного подвижного состава / И. В. Колесников, С. Ф. Подуст, С. С. Подуст, А. Н. Чукарин. – Москва : ВИНИТИ РАН, 2015. — 216 с.

12.Никифоров, А. С. Акустическое проектирование судовых конструкций / А. С. Никифоров. — Ленинград : Судостроение, 1990. — 200 с.

13.Чукарин, А. Н. Исследование эффективных коэффициентов потерь энергии колебаний в стержневых конструкциях / А. Н. Чукарин, А. П. Сычев, С. Ф. Подуст // Вестник машиностроения. — 2015. — №7. — С. 35–37.

References

1. Van Beek, A., et al. State of the art: Technical Report. SNCF, 2002, p. 78.

2. Podust, S.F., Pronnikov, Y.V. Spektral'nyy sostav shuma v kabinakh lokomotivov. [The spectral composition of the noise in the cabs of locomotives.] Tr. mezhdunar. nauch.-prakt. konf. «Transport-2013». [Proc. Int. Sci.-Pract. Conf. “Transport-2013”.] Rostov State Transport University (RSTU), Rostov-on-Don, 2013, vol. 2, pp. 215–216 (in Russian).

3. Podust, S.F. Analiz zakonomernostey shumoobrazovaniya elektropoyezdov. [Analysis of patterns of electric noise generation]. Vestnik of RSTU, 2012, no.14, pp. 42–45 (in Russian).

4. Podust, S.F., Kuklin, D.A. Modelirovaniye vibroakusticheskoy dinamiki rel'sa na shpalakh [Vibroacoustic dynamics simulation of rail on sleepers.] Vestnik of DSTU, 2013, no. 1–2 (70–71), pp. 106–111 (in Russian).

5. Podust, S.F. Modelirovaniye vibroakusticheskoy dinamiki shpal pri dvizhenii podvizhnogo sostava [Modeling vibroacoustic dynamics of sleepers when rolling equipment in motion.] Vestnik of RSTU, 2013, no. 1, pp. 50–54 (in Russian).

6. Podust, S.F. Eksperimental'nyye issledovaniya shuma i vibratsii gruzovykh poyezdov [Experimental studies of noise and vibration of freight trains.] IX Promyshlennyy kongress yuga Rossii: sb. statey (11–13 sentyabrya 2013, Rostov-na-Donu) [Proc. IX Industrial Congress of South Russia: 11-13 September, 2013, Rostov-on-Don.] DSTU Publ. Centre, 2013, pp. 212–214 (in Russian).

7. Podust, S.F., Pronnikov, YU.V. Eksperimental'nyye issledovaniya dissipativnoy funktsii elementov osteklеniya elektrovozov[Experimental studies of dissipation function of locomotive glazing elements.] IX Promyshlennyy kongress yuga Rossii: sb. statey (11–13 sentyabrya 2013, Rostov-na-Donu). [Proc. IX Industrial Congress of South Russia: 11-13 September, 2013, Rostov-on-Don.] DSTU Publ. Centre, 2013, pp. 215–221 (in Russian).

8. Pronnikov, YU.V. Modelirovaniye strukturnoy sostavlyayushchey shuma v kabinakh mashinistov podvizhnogo sostava[Modelling of the structural component of the noise in the rolling stock driving cab.] Vestnik of RSTU, 2010, no. 3, pp. 64–68 (in Russian).

9. Kolesnikov, I.V., Pronnikov, Y.V., Chukarin, A.N. Osnovy akusticheskogo proyektirovaniya kabin mashinistov (teoriya i praktika) [Basics of acoustic design of the driving cab (Theory and Practice).] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2012, 120 p. (in Russian).

10. Podust, S.F., Chukarin, A.N., Boguslavskiy, I.V. Osnovy vibroakusticheskikh raschetov otechestvennykh elektrovozov. Monografiya [Fundamentals of vibroacoustic calculations of domestic locomotives. Monograph.] Rostov-on-Don: DSTU Publ. Centre, 2013, 160 p. (in Russian).

11. Kolesnikov, I.V., Podust, S.F., Podust, S.S., et al. Sposoby snizheniya shuma i vibratsiy pri proyektirovanii, proizvodstve i ekspluatatsii zheleznodorozhnogo podvizhnogo sostava [Ways to reduce noise and vibration in the design, manufacture and operation of rolling stock.] Moscow: VINITI RAN, 2015, 216 p. (in Russian).

12. Nikiforov, A. S Akusticheskoe proektirovanie sudovykh konstruktsiy. [Acoustic design of ship structures.] Leningrad: Sudostroenie, 1990, 200 p. (in Russian).

13. Chukarin, A.N., Sychev, A.P., Podust, S.F. Issledovanie effektivnykh koeffitsientov poter' energii kolebaniy v sterzhnevykh konstruktsiyakh. [Investigation of effective coefficients of oscillation energy loss in the frame structures.] Vestnik Mashinostroeniya,2015, no.7, pp. 35–37 (in Russian).

Поступила в редакцию 19.10.2015
Сдана в редакцию 19.10.2015
Запланирована в номер 22.01.2016

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 631.22 DOI 10.12737/18275

Исследование параметров магнитного поля в рабочей камере индуктора*

Н. В. Лимаренко[1], В. П. Жаров[2], Ю. В, Панов[3], Б. Г. Шаповал[4]**

[1,2,3,4] Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Study on magnetic field parameters in the inductor working chamber ***

N. V. Limarenko[1], V. P. Zharov[2], U. V. Panov[3], B. G. Shapoval[4]**

[1,2,3,4] Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Рассмотрен индуктор, позволяющий использовать магнитное поле в технологических процессах сельского хозяйства. Исследованы интенсивность, направленность и однородность магнитного поля в рабочей камере индуктора. Использовались методы инструментального, прямого и косвенного измерения, статистической обработки данных, методы аналого-цифрового преобразования данных. Представлена методика измерения векторной характеристики электромагнитного поля – магнитной индукции, оценивающей качество протекания технологического процесса в рабочей камере индуктора. Разработана кибернетическая модель экспериментального исследования, по оценке качества функционирования индуктора. Определены распределения радиальной и осевой составляющих магнитной индукции в рабочей камере, выявлен участок с наиболее однородной величиной и направлением вектора магнитной индукции, образующий рабочую зону индуктора. Выявлена наиболее значимая составляющая вектора магнитной индукции для данного технологического процесса и типа индуктора. Полученные результаты важны при проектировании новых конструкций индукторов.

Ключевые слова: индуктор; рабочая камера индуктора; магнитная индукция; интенсивность; направленность.

The inductor which allows the usage of the magnetic field in the agriculture technological processes is considered. The measuring technique of the electromagnetic field vector characterization – magnetic induction that evaluates the quality of the technological process in the inductor chamber – is offered. Intensity, directivity, and uniformity of the magnetic field in the inductor working chamber are investigated. The techniques of the instrumental, direct and indirect measurements, and statistical data processing, as well as methods of analog-to-digital data conversion are used. A cybernetic model of the experimental research to assess the inductor performance quality is developed. The distribution of the radial and axial components of the magnetic induction in the working chamber is determined; the area with the most uniform magnitude and the magnetic-field direction which forms the inductor working area is identified. The most significant component of the magnetic induction vector for this process and the type of inductor is revealed. The results obtained are important for the development of new inductor constructions.

Keywords: inductor, inductor working chamber, magnetic induction, intensity, directivity.

Введение. В сельском хозяйстве множество технологических процессов включают операцию обеззараживания. Такие процессы связаны, главным образом, с обеззараживанием сточных вод, сельскохозяйственных отходов и типичны для животноводства, птицеводства и рыбоводства.

Поскольку результаты технологических процессов, включающих операцию обеззараживания, определяются характером электромагнитного поля, создаваемого индуктором, то исследование соответствующих свойств индуктора крайне актуально.

Несмотря на определённые успехи в исследовании вопроса применения эффектов электромагнетизма в сельском хозяйстве (Логвиненко Д. Д. [1], Вершинин Н. П. [2] и их последователи), завершённой теории индукторов до настоящего времени нет. Известно, что характеристики магнитного поля (МП) определяются свойствами индуктора и оказывают большое влияние на качество и длительность протекающего в нём технологического процесса [3, 4, 5]. Однако вопрос исследования свойств рабочей камеры индуктора, позволяющий выделить зону наиболее активного воз-

* Работа выполнена в рамках инициативной НИР.

** E-mail: nikolajj-limarenko@rambler.ru, zharovvp@mail.ru, nba-shapoval@yandex.ru, u-panov@yandex.ru

*** The research is done within the frame of the independent R&D.

действия МП на технологический материал, до настоящего времени изучен недостаточно. Также неизвестны математические модели, позволяющие адекватно определить параметры МП в рабочей камере.

Поэтому экспериментальное исследование параметров МП в рабочей камере индуктора является актуальным вопросом, решение которого и составляет цель данной работы.

Экспериментальные исследования. Рассмотрен индуктор конструкции Вершинина Н. П. [6], схема которого представлена на рис. 1.

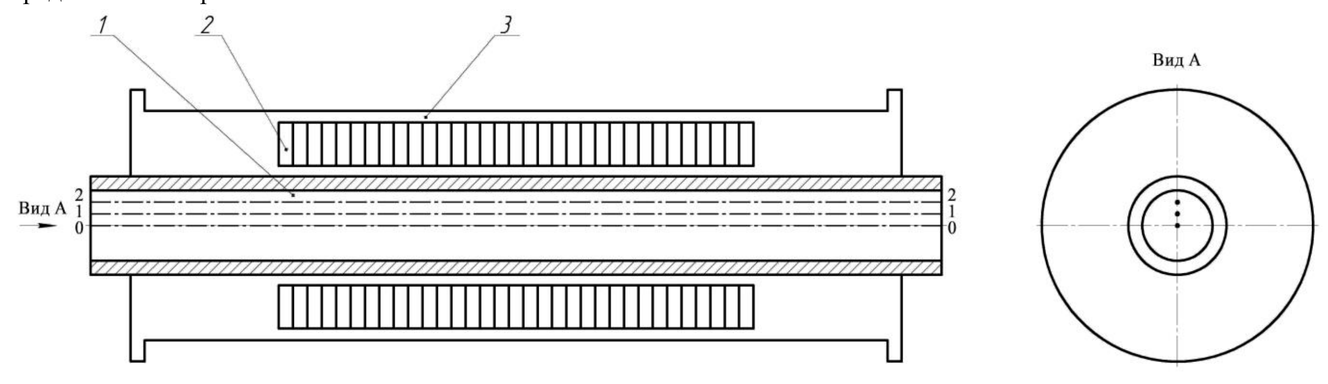


Рис. 1. Схема индуктора:
1 — рабочая камера; 2 — обмотки; 3 — корпус

Индуктор представляет собой статор, генерирующий вращающееся переменное электромагнитное поле. Состоит он из корпуса 3, внутри которого расположен цилиндрический сердечник 2 из ферромагнитного материала с электрообмотками, смещёнными друг относительно друга на угол 120° в пространстве, в отверстии которого вставлена труба 1 из парамагнитного материала.

МП определяется его интенсивностью, направленностью и однородностью. Для характеристики интенсивности воздействия магнитного поля используются следующие физические величины: магнитный поток, напряжённость, магнитная индукция.

Наиболее информативной характеристикой МП является магнитная индукция (МИ) — векторная величина $\vec{B}$ в Тл, являющаяся силовой характеристикой магнитного поля в точке.

Представительно определяется средневыпрямленное значение МИ, которое позволяет минимизировать систематическую погрешность, поскольку исследуемое устройство работает с синусоидальным напряжением. Соответственно, в качестве параметров, характеризующих МП в рабочей камере индуктора, принимаются средневыпрямленные значения радиальной B_m^p и осевой B_m^o составляющих МИ.

Анализ литературных источников [1–9] и результаты предварительных исследований свидетельствуют, что величина МИ в рабочей камере индуктора зависит от:

— координаты точки измерения МИ;

— уровня активной мощности в электрической цепи индуктора (далее активная мощность);

В данном исследовании индуктор питается трёхфазным током промышленной частоты.

Кибернетическая модель системы, отображающая связи объекта исследования с параметрами, факторами и условиями, представлена на рис. 2.

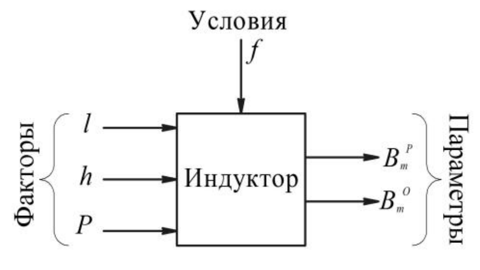


Рис. 2. Блок-схема кибернетической модели системы. Варьируемые факторы:
l — расстояние от края индуктора, см; h — расстояние от центральной продольной оси индуктора, см; P — активная мощность, кВт. Условия: f — частота колебаний электрического тока, Гц. Параметры: B_m^P и B_m^O — средневыпрямленные значения радиальной и осевой составляющих МИ

Измерение значений МИ производилось портативным универсальным миллитесламетром ТПУ с датчиками Холла. Относительная погрешность измерений не превышала 3%.

Измерение МИ производилось по следующей методике. В рабочей камере индуктора в необходимом месте вдоль продольной оси измерения МИ закреплялась направляющая в виде трубы с высокой магнитной проницаемостью, что обеспечивало фиксированное перемещение датчика вдоль продольной оси.

Точка измерения МИ размещалась на трёх различных расстояниях от центральной продольной оси индуктора и перемещалась вдоль неё в пределах рабочей камеры.

Конструктивное исполнение индуктора позволяет устанавливать три уровня активной мощности.

За счёт нестабильности напряжения электрического тока в подводящей сети происходило некоторое изменение уровня активной мощности, которое не превышало 2%. Такая случайная погрешность устранялась серией опытов.

Для определения активной мощности фиксировались текущие значения фазового напряжения и силы тока в электрической цепи индуктора, а также косинус угла сдвига фаз напряжения и тока — cos φ.

Измерение значений контролируемых параметров и их первичная обработка осуществлялись с использованием контрольно-измерительного комплекса (КИК), созданного авторами, и представленного на рис. 3. Все средства измерения, использованные в процессе исследования, сертифицированы и поверены.

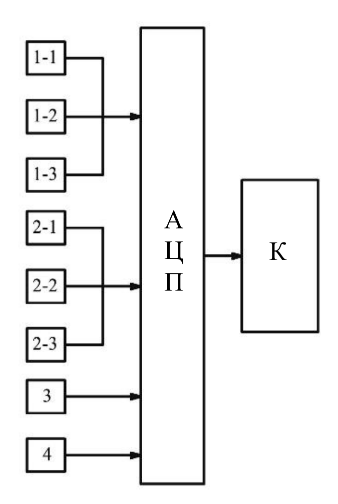


Рис.3. Блок-схема КИК: 1–1; 1–2; 1–3 — датчики измерения фазового напряжения электрического тока на входе индуктора $U_Ф$ в B; 2–1; 2–2; 2–3 — датчики измерения фазовой силы электрического тока на входе индуктора $I_Ф$ в А; 3 — датчик измерения частоты колебания электрического тока f в Гц; 4 — датчик измерения магнитной индукции B_m в мТл; АЦП — аналого-цифровой преобразователь; К — компьютер

План эксперимента представлен в таблице 1.

Таблица 1

План эксперимента

№ опыта	Значения активной мощности, кВт	Ось измерения	Составляющая МИ
1	5	0-0	Радиальная
2	5	0-0	Осевая
3	5	1-1	Радиальная
4	5	1-1	Осевая
5	5	2-2	Радиальная
6	5	2-2	Осевая
7	3	0-0	Радиальная
8	3	0-0	Осевая
9	3	1-1	Радиальная
10	3	1-1	Осевая
11	3	2-2	Радиальная
12	3	2-2	Осевая
13	2	0-0	Радиальная

14	2	0-0	Осевая
15	2	1-1	Радиальная
16	2	1-1	Осевая
17	2	2-2	Радиальная
18	2	2-2	Осевая

Для уменьшения систематических ошибок применялась рандомизация. Каждый опыт дублировался три раза. Статистическая обработка экспериментальных данных осуществлялась в автоматизированном режиме с использованием программных комплексов Statistica 6.0.

Обсуждения и результаты. Анализ результатов опытов, частично представленных на рис. 4, позволил установить:

— значения радиальной и осевой составляющих МИ в рабочей камере индуктора не являются постоянными величинами;

— радиальная составляющая МИ на участке 0–25 равна, или приблизительно равна, нулю. На участке 25–40 резко возрастает до максимума. На участке 40–90 остаётся постоянной. На участке 90–115 резко убывает, а на участке 115–130 равна, или приблизительно равна, нулю;

— максимальные значения МИ на участке 40–90 обусловлены конструктивной особенностью индуктора, а именно — наличием на этом участке ферромагнитного сердечника. Анализ вышеизложенных фактов позволил выделить зону наиболее активного воздействия магнитного поля, которая может быть принята за рабочую зону индуктора;

— возрастание и убывание значений МИ на участках 25–40 и 90–115 обусловлено краевыми эффектами, возникающими на концах сердечника;

—значения осевой составляющей МИ изменяется, примерно, аналогично изменениям радиальной составляющей МИ.

— средние значения радиальной составляющей на участке 40–90 равны 61,6 мТл, а осевой — 3,9 мТл, что составляет всего 6,3 % от значения радиальной составляющей.

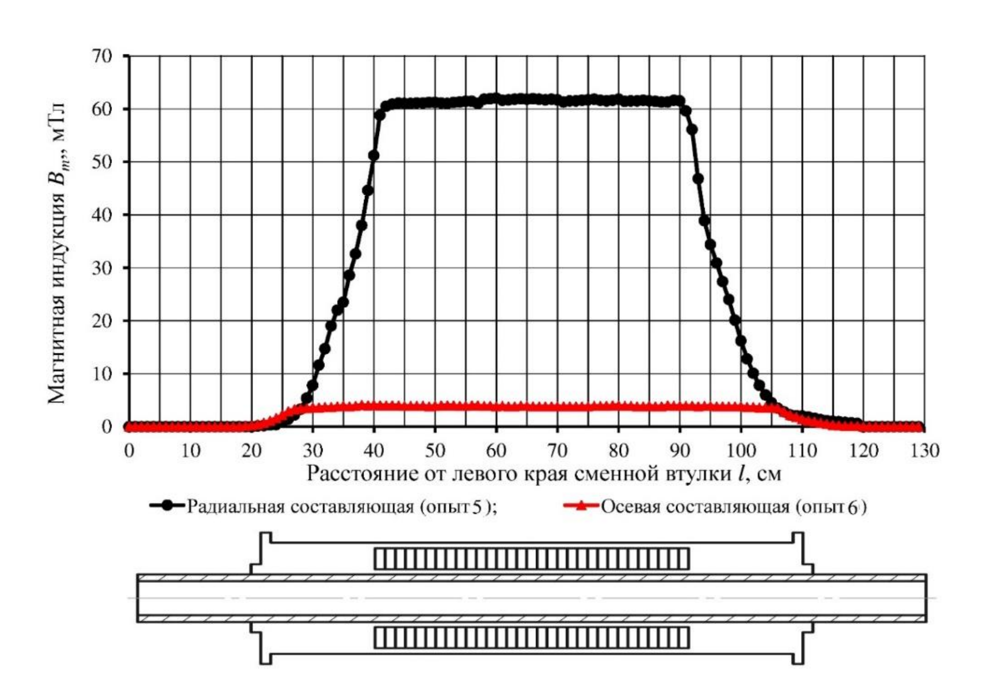


Рис. 4. Результаты опытов

Анализ результатов опытов, частично представленных на рис. 5, позволил установить, что удаление координаты измерения относительно центральной продольной оси индуктора (рис.1) не оказывает существенного влияния на значения МИ.

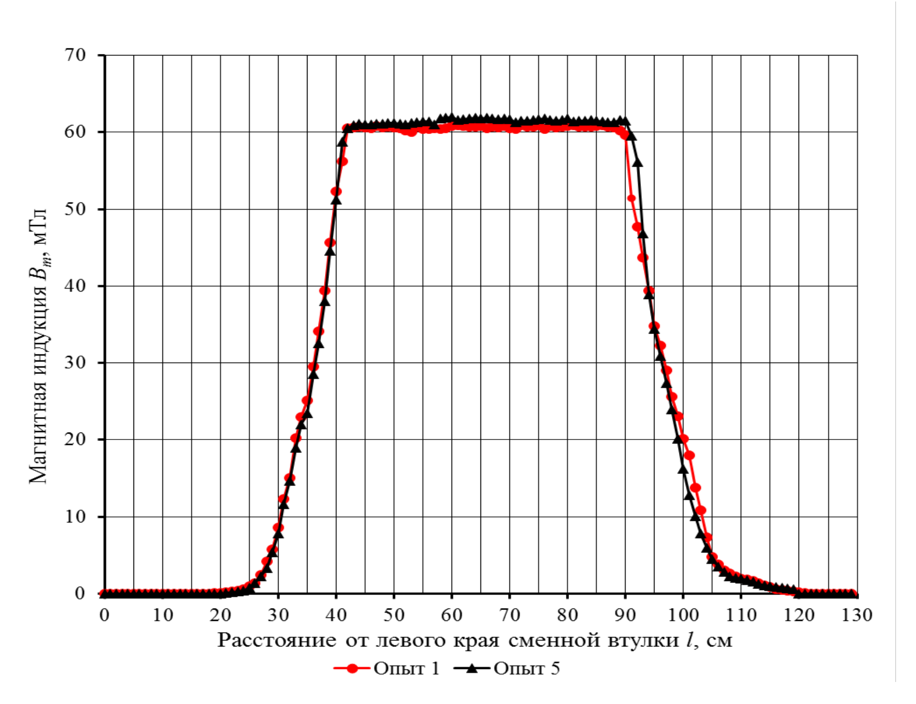


Рис. 5. Результаты опытов

Проверка полученных значений оценок дисперсий МИ на участке 40–90 для всех опытов на однородность по критерию Кохрена показала, что при выбранном уровне значимости α = 0,05 расчетное значение G_p меньше критического значения $G_к$ [10], следовательно, гипотеза об однородности МП в рабочей зоне индуктора справедлива.

Анализ результатов опытов, частично представленных на рис.6, позволил установить, что с увеличением уровня активной мощности значения МИ в рабочей камере возрастают до магнитного насыщения материала сердечника.

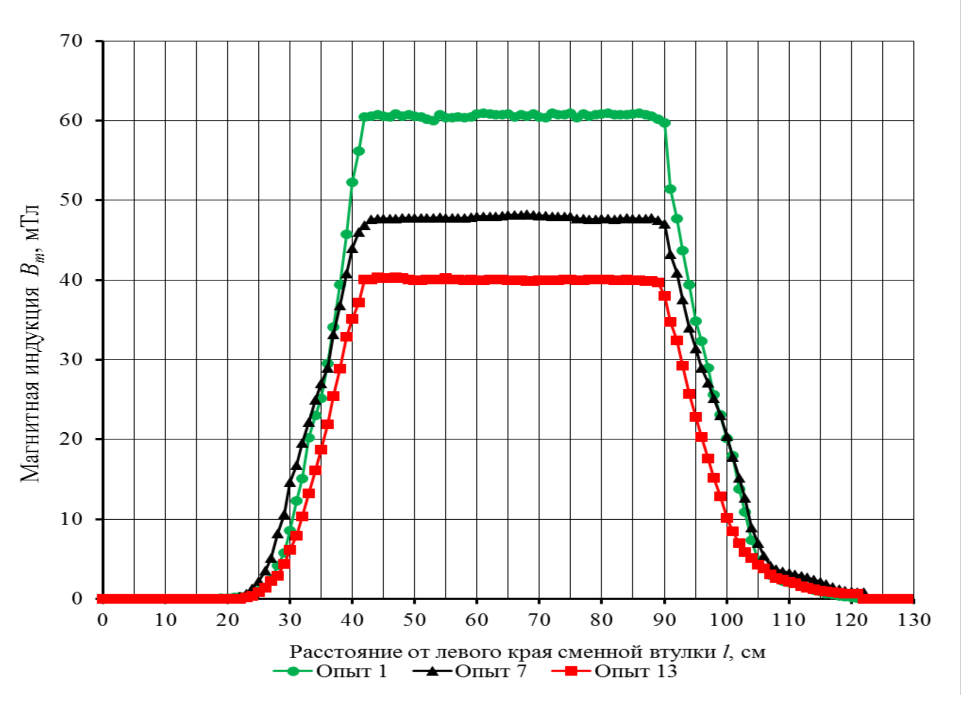


Рис. 6. Результаты опытов

Выводы.

На основании проведенного анализа можно сделать следующие заключения:

— магнитная индукция в рабочей зоне (на участке индуктора 40–90) однородна;

— значения радиальной составляющей МИ значительно превосходят значения осевой составляющей.

Проведенное исследование позволило оценить влияние собственных свойств индуктора на интенсивность МП и перейти к дальнейшим исследованиям влияния МП на технологический материал. Полученные результаты важны как при проектировании новых индукторов, так и для повышения эффективности уже эксплуатируемых устройств.

Библиографический список

1. Логвиненко, Д. Д. Интенсификация технологических процессов в аппаратах с вихревым слоем / Д. Д. Логвиненко, О. П. Шеляков // Техника : Киев, 1976. — 144 с.

2. Вершинин, И. Н. Аппараты с вращающимся электромагнитным полем / И. Н. Вершинин, Н. П. Вершинин // Сальск, 2007. — 368 с.

3. Володин, Г. И. Электромеханические процессы в устройствах с произвольной подвижной частью : дисс. докт. тех. наук : 05.09.01 / Юж.-Рос. Гос. техн. ун-т (НПИ), Новочеркасск, 2009. — 304 с.

4. Деревянкин, Н. А. Аппараты с вихревым слоем в химической технологии. Обзорная информация. Химическое и нефтеперерабатывающее машиностроение / Н. А. Деревянкин, З. А. Михалёва // Тамбов, 1989. — 37 с.

5. Климов, Е. А. Оценка влияния составляющих нулевой последовательности на эффективность работы электромеханического активатора (Аппарата с вихревым слоем) / Е. А. Климов, В. В. Колосков, В. Е. Сапрыкин // Известия ВУЗов. Электромеханика. — 2012. — №1. — с. 67–71.

6. Вершинин, Н. П. Установки активации процессов. Использование в промышленности и в сельском хозяйстве. Экология. / Н. П. Вершинин // Ростов-на-Дону, 2004. — 314 с.

7. Zheng, C. Fresh water disinfection by pulsed low electric field / C Zheng, Y Xu, Z Liu and K Yan // Journal of Physics: Conference Series. — 2014. Vol. 594. 142–148 p.

8. M. Fernanda San Martin. Inactivation effect of an 18-T pulsed magnetic field combined with other technologies on Escherichia coli / M. Fernanda San Martin, Federico M. Harte, Huub Levieveld, Gustavo V. Barbosa- Cánovas, Barry G. // Innovative Food Science & Emerging Technologies, — 2001. — Vol. 2. — Iss. 4. — Pp. 273–277.

9. Адошев, А. И. Ферровихревой аппарат для обработки жидкого навоза / А. И. Адошев // Сельский механизатор. — 2007. — №6 — С. 32–33.

10. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей : уч. для вузов / Е. С. Вентцель. — Москва : Наука, 1969. — 576 с.

References

1. Logvinenko, D.D., Shelyakov, O.P. Intensifikatsiya tekhnologicheskikh protsessov v apparatakh s vikhrevym sloem. [Intensification of technological processes in units with velocity layer.] Kiev: Tekhnika, 1976, 144 p. (in Russian).

2. Vershinin, I.N., Vershinin, N.P. Apparaty s vrashchayushchimsya elektromagnitnym polem. [Devices with a rotating electromagnetic field.] Salsk, 2007, 368 p. (in Russian).

3. Volodin, G.I. Elektromekhanicheskie protsessy v ustroystvakh s proizvol'noy podvizhnoy chast'yu: diss. dokt. tekh. nauk. [Electromechanical processes in units with an arbitrary movable element: Dr.Sci. (Eng.) diss.] South-Russian State Polytechnic University (NPI), Novocherkassk, 2009, 304 p. (in Russian).

4. Derevyankin, N.A., Mikhaleva, Z.A. Apparaty s vikhrevym sloem v khimicheskoy tekhnologii. Obzornaya informatsiya. Khimicheskoe i neftepererabatyvayushchee mashinostroenie. [Vortex layer devices in chemical engineering. Survey information. Chemical and oil-refining engineering.] Tambov, 1989, 37 p. (in Russian).

5. Klimov, E.A., Koloskov, V.V., Saprykin, V.E. Otsenka vliyaniya sostavlyayushchikh nulevoy posledovatel'nosti na effektivnost' raboty elektromekhanicheskogo aktivatora (Apparata s vikhrevym sloem). [Assessment of the null component impact on the electromechanical activator efficiency (Vortex layer device).] Izvestia vuzov. Electromechanics, 2012, no. 1, pp. 67–71 (in Russian).

6. Vershinin, N.P. Ustanovki aktivatsii protsessov. Ispol'zovanie v promyshlennosti i v sel'skom khozyaystve. Ekologiya. [Units for process activation. Utilization in industry and agriculture. Ecology.] Rostov-on-Don, 2004, 314 p. (in Russian).

7. C Zheng, Y Xu, Z Liu and K Yan. Fresh water disinfection by pulsed low electric field. Journal of Physics: Conference Series. 2014, vol. 594, pp. 142–148.

8. M. Fernanda San Martin, Federico M. Harte, Huub Levieveld, Gustavo V. Barbosa- Cánovas, Barry G. Swanson. Inactivation effect of an 18-T pulsed magnetic field combined with other technologies on Escherichia coli. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2001, vol. 2, iss. 4, pp. 273–277.

9. Adoshev, A.I. Ferrovikhrevoy apparat dlya obrabotki zhidkogo navoza. [Ferro-vortex unit for black liquid processing.] Selskiy Mechanizator, 2007, no. 6, pp. 32–33 (in Russian).

10. Ventsel, E.S. Teoriya veroyatnostey: uchebnik dlya vuzov. [Probability theory: college textbook.] Moscow: Nauka, 1969, 576 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 24.03.2015
Сдана в редакцию 24.03.2015
Запланирована в номер 22.01.2016

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ INFORMATION TECHNOLOGY, COMPUTER SCIENCE, AND MANAGEMENT



УДК 519.87:681.51 DOI 10.12737/18276

Автоматическая система взаимно инвариантного векторного управления переменными технологического состояния аппарата приготовления раствора*

Р. А. Нейдорф [1], М. Н. Мохсен[2]**

[1, 2]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Automatic system of mutually invariant vector control of mixer technology state variables***

R. A. Neydorf [1], M. N. Mohsen[2]**

[1, 2]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью данной работы является повышение эффективности автоматизации технологических процессов химической промышленности и родственных ей отраслей. Рассматривается типичный для отрасли процесс приготовления раствора и решается задача разработки векторного закона управления, эффективного как в плане интенсивности или быстродействия, так и в плане взаимной инвариантности процессов управления различными технологическими переменными. Для решения этой задачи использован подход к синтезу законов управления на основе желаемых характеристик синтезируемой системы управления. При построении желаемой математической модели управляемого аппарата приготовления раствора задействована математическая модель квазиоптимального по быстродействию управления. В результате синтеза сформулирован достаточно сложный нелинейный векторный закон управления, который, однако, обеспечивает все свойства, заложенные в парадигму его построения и реализации. Выполнено имитационное моделирование многоконтурной системы автоматического управления с реализацией синтезированных законов и исследование построенной модели. Это позволило полностью подтвердить абсолютную автономность управления уровнем раствора выходного потока в аппарате, а также его концентрацией. Кроме того, доказана независимость управляемых переменных от изменения нагрузки — расхода приготавливаемого раствора. Полученные данные могут быть использованы на химических и родственных им производствах (пищевых, нефтеперерабатывающих и др.). Материалы и результаты представленных исследований показывают, что для эффективного синтеза векторных законов управления нелинейными многосвязными объектами метод эталонных математических моделей может использоваться в сочетании с парадигмой квазиоптимизации быстродействия этих законов.

The work objective is to improve the automation efficiency of the technological processes of the chemical industry and the related industries. A typical for the industry solution preparation process is considered; and the task of developing a vector control law, effective in terms of both intensity or speed and cross-invariance of the management processes of various technological variables, is solved. To cope with this task, the approach to the control laws synthesis based on the desired characteristics of the synthesized control system is taken. A mathematical model of the quasi-optimal speed control is used to construct the desired mathematical model of the controlled machine for the solution preparation. The synthesis is resulted in a rather complex non-linear vector control law which, however, provides all the properties inherent in the paradigm of its creation and implementation. Simulation modeling of a multistage automatic control system with the implementation of the synthesized laws is carried out, as well as the research of the constructed model. This allows fully confirm an absolute control autonomy of the outflow solution level in the unit and of its concentration. Besides, the independence of the controlled variables from the changing load — flow fluid preparation – is established. The results obtained are intended for the implementation in the chemical technology and the related industries (food processing, oil refining, etc.). The materials and the research results presented show that for an effective synthesis of the vector control laws of nonlinear multiply connected objects, the method of reference mathematical models can be applied along with the quasi-optimization speed performance of these laws.

Ключевые слова: технологический процесс, аппарат, приготовление раствора, математическая модель, переменная состояния, закон управления, автономность, многосвязность, быстродействие.

Keywords: technological process, apparatus, solution preparation, mathematical model, state variable, control law, autonomy.

* Работа выполнена в рамках индивидуального плана аспирантской подготовки.

** E-mail: ran_pro@mail.ru, Mohammed.naima@gmail.com

*** The research is done within the frame of the individual postgraduate plan.

Введение. Наряду с совершенствованием технологии автоматизация производства является ключевой составляющей развития любой промышленности: химической, микробиологической, пищевой и др. При автоматизации промышленных производств объектом автоматизации является обычно не отдельный технологический процесс или аппарат, а некий технологический модуль, комплекс или линия со сложными взаимосвязями между его агрегатами, коммуникациями, потоками и пр. Современные системы автоматизации таких комплексов должны обладать широкими функциональными возможностями, новыми техническими характеристиками. Выполнение указанных требований позволяет обеспечить высокую надежность (живучесть) элементов управления, их информативность, функциональность, быстродействие, комфортность работы оператора и пр. [1–3].

Однако все перечисленные качества автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) характеризуют не только средства и системы централизованного управления. Корни этих свойств — в так называемых локальных системах автоматического управления (ЛСАУ) [4–6]. Это обусловлено рядом причин. Во-первых, именно ЛСАУ ориентированы на работу с первичной информацией о состоянии технологического процесса. Во-вторых, они непосредственно воздействуют на исполнительные механизмы регулирующих органов управления процессом. Таким образом, именно на нижнем уровне — уровне локальных САУ формируются фундаментальные свойства АСУ ТП. К ним относится, прежде всего, быстродействие управления: очевидно, что никакая системная надстройка не повысит скорость медленно функционирующей системы, непосредственно воздействующей на объект.

Постановка задачи. В настоящей статье ставится задача исследовать возможности синтеза САУ локального уровня, обеспечивающие близкое к максимальному быстродействие управления технологическим процессом.

Математическая модель аппарата приготовления раствора (АПР). Аппарат представляет собой технологическую емкость, которая оборудована трубопроводами подачи смешиваемых потоков и отвода смеси, а также эффективной мешалкой. В емкость подаются растворитель с расходом G_0 и раствор некоторого вещества высокой концентрации C_0 с расходом G_C, как показано на рис. 1. Управление таким аппаратом сводится к поддержанию заданной выходной концентрации C приготавливаемого раствора и его уровня в аппарате при заданной общей производительности G.

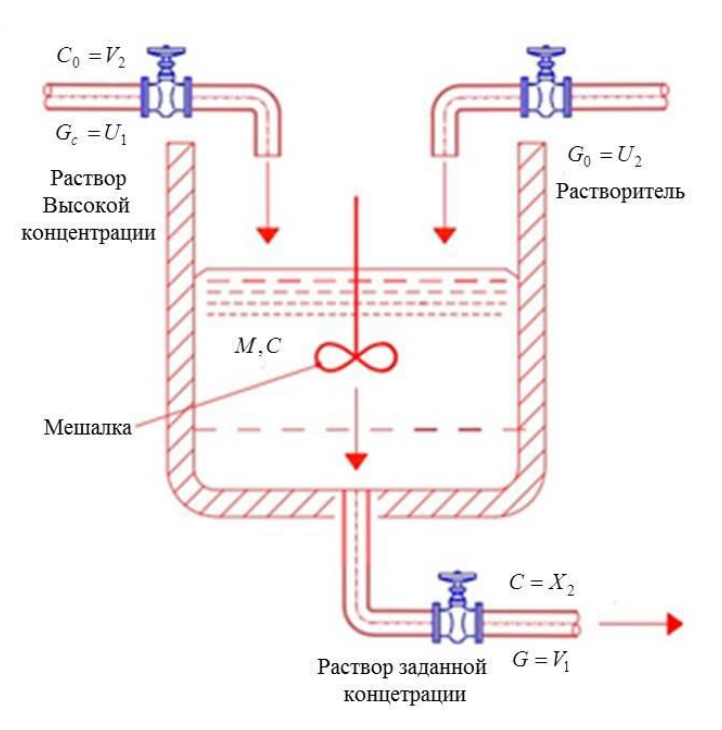


Рис. 1. Расчетная схема аппарата приготовления раствора

Достаточно адекватная математическая модель (ММ) такого аппарата как объекта управления (ОУ) может быть получена на основании закона сохранения количества вещества, применяемого как ко всем компонентам процесса в общем потоке, так и к отдельным его компонентам [7–9].

По закону сохранения количества вещества общее количество раствора в аппарате в условиях нестационарности процесса будет подчиняться следующему уравнению баланса:

$$d_t M = \left(G_0 + G_c - G\right) \cdot dt\ , \qquad (1)$$

где M — количество раствора в аппарате, которое с учетом нестационарности M считается функцией времени; d_t — дифференциал переменной по независимому аргументу t — времени.

По этому же закону количество вещества, находящегося в аппарате в растворенном виде, также будет подчиняться составленному для него в отдельности уравнению баланса неустановившегося процесса:

$$d_t(C \cdot M) = \left(C_0 \cdot G_C - C \cdot G\right) \cdot dt\ , \qquad (2)$$

где C_0, C — массовая концентрация.

Концентрация всего раствора в аппарате и концентрация выходного потока обозначаются одинаково — C. Это обосновано гипотезой об «идеальном смешении» [7], опирающейся на предположение о высокой эффективности мешалки. Преобразуя выражения (1) и (2), получим дифференциальные уравнения (ДУ):

$$\frac{dM}{dt} = G_C + G_0 - G\ , \qquad (3)$$

$$C\frac{dM}{dt} + M\frac{dC}{dt} = C_0 \cdot G_C - C \cdot G. \qquad (4)$$

Преобразование (4) подстановкой в него (3) позволяет получить корректный вид этого ДУ:

$$M \cdot \frac{dC}{dt} = \left(C_0 - C\right) \cdot G_C - C \cdot G_0\,. \qquad (5)$$

В свете задачи управления технологическим процессом смешения переменными состояния (ПС) объекта следует считать уровень в емкости $H \overset{об}{=} x_1$ и выходную концентрацию $C \overset{об}{=} x_2$, где символом « $\overset{об}{=}$ » отмечено «равенство по обозначению». Управляющими воздействиями процесса формирования концентрации на выходе АПР будут $G_C \overset{об}{=} u_1$ и $G_0 \overset{об}{=} u_2$. Естественными возмущающими воздействиями для АПР являются технологическая нагрузка на аппарат — потребляемый технологической линией расход приготовленного раствора ($G \overset{об}{=} v_1$) и концентрация используемого сырья ($C_0 \overset{об}{=} v_2$).

Таким образом, для получения рабочей ММ аппарата смешения как ОУ необходимо выразить величину H через другие технологические параметры и переменные [7–10]. Это можно сделать через несложную зависимость массы раствора M от его объема V и плотности ρ, которая, в свою очередь, зависит от концентрации C и температуры T:

$$M = V \cdot \rho = H \cdot S \cdot \rho\left(C, T\right) = k_H^{-1} \cdot H\ , \qquad (6)$$

где $k_H^{-1} = S \cdot \rho_0$, считая в условиях стабилизации концентрации C и температуры T $\rho\left(C,T\right) = \rho_0 = const$.

Тогда ММ АПР как ОУ в выбранных ПС будет представлена системой ДУ в форме Коши следующего вида:

$$\dot{x}_1 = k_H \cdot u_1 + k_H \cdot u_2 - k_H \cdot v_1, \qquad (7)$$

$$\dot{x}_2 = -k_H \cdot \frac{x_2}{x_1} \cdot \left(u_1 + u_2\right) + k_H \cdot \frac{u_1 \cdot v_2}{x_1}\ . \qquad (8)$$

Анализ системы ДУ (7, 8) показывает, что первое ДУ (7) является линейным и определяет для канала управления уровнем свойство астатизма первого порядка. Однако второе ДУ (8) является существенно нелинейным. Поэтому динамические свойства АПР исследованы с использованием схемы имитационного моделирования, приведенной на рис. 2, а. Эта схема послужила также моделью при исследовании динамических свойств системы автоматического управления АПР.

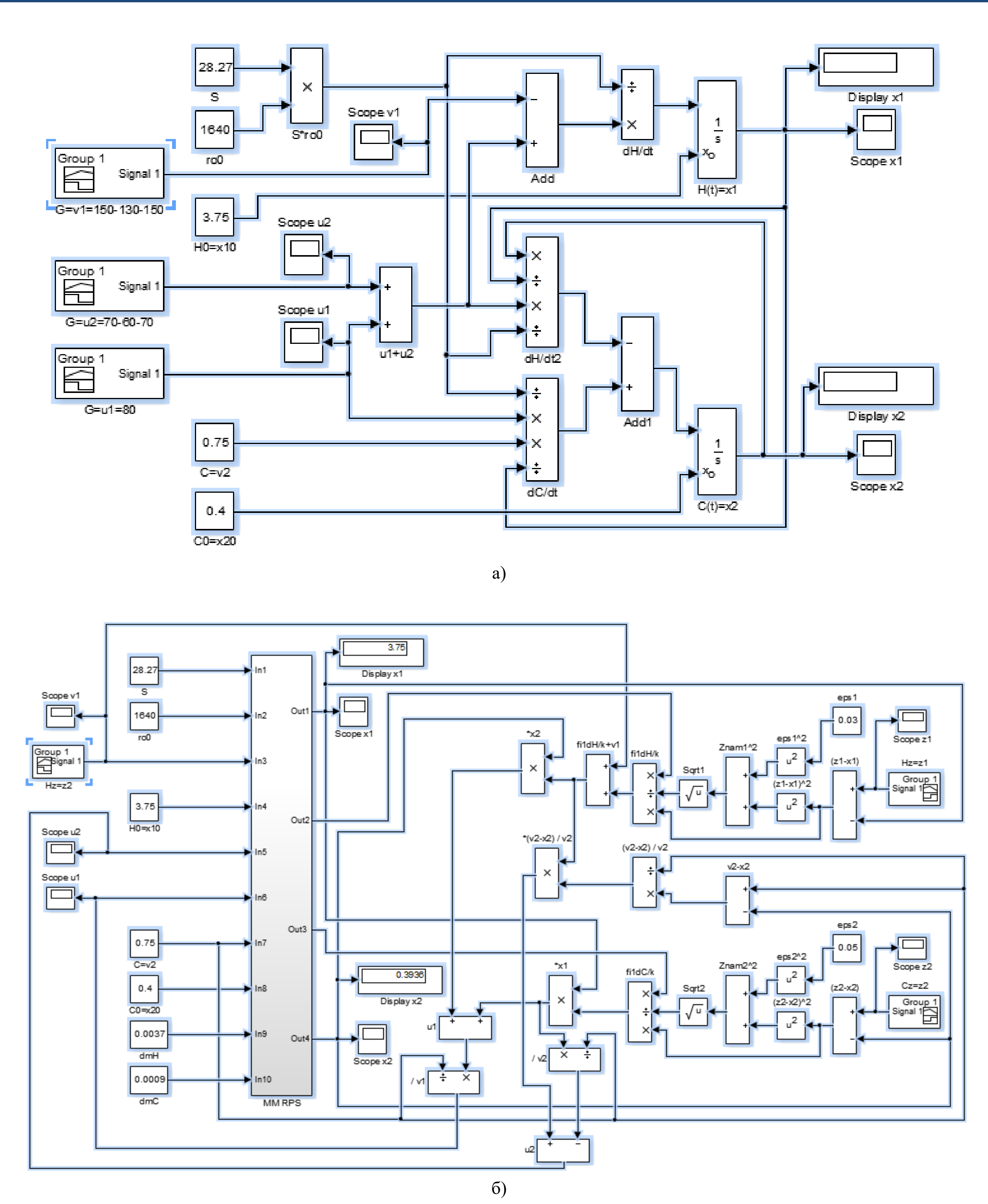


Рис. 2. Схемы имитационного моделирования: АПР как объекта управления (а); САУ АПР (б)

Очевидно, что процедура синтеза законов управления АПР при существенной нелинейности составляющей (8) его ММ неординарна и требует индивидуальных исследований. Это особенно актуально в связи с очевидными ограничениями на величины управляющих потоков G_C и G_0, существующими в реальных технологических схемах при высоких требованиях к точности поддержания концентрации и быстродействию подавления ошибок управления. Последнее обусловлено необходимостью поддержания максимальной производительности АПР в рамках реальных конструктивных и технологических ограничений [5, 8, 11].

Синтез двумерного закона квазиоптимального управления АПР. В предыдущем разделе получена ММ АПР в виде системы ДУ (7) и (8), характеризующейся сложным взаимодействием переменных состояния, управляю-

щих и возмущающих воздействий. Поскольку управлению подлежат две ПС, управление должно быть также двумерным, т.е. векторным. Для синтеза такого управления с учетом сформулированной выше постановки задачи можно воспользоваться подходами, предложенными для различных приложений в работах [5, 8, 11, 12, 13, 14, 15, 16]. Анализ представленных источников позволяет выделить два подхода. Суть первого из них состоит в формировании закона управления объектом на основе желаемой (или эталонной) ММ проектируемой САУ. Суть второго подхода состоит в формировании форсированного закона изменения производных ПС эталонной ММ САУ с гарантированным ограничением по амплитуде. Так, в соответствии с парадигмой этого подхода можно задаться системой желаемых ДУ [15, 16], причем в виде, предложенном в [13, 14]:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2; \\ \dot{x}_2 = \dfrac{a_m}{\sqrt{\left[z-\left(x_1+\mu\cdot x_2\right)\right]^2+\varepsilon^2}}\cdot\left[z-\left(x_1+\mu\cdot x_2\right)\right]. \end{cases} \tag{9}$$

Однако такое решение неприменимо к объекту, описываемому ММ (7), (8), т. к. ПС x_1 и x_2 имеют кардинально отличающиеся размерности. Приведение их к единой размерности требует применения размерного коэффициента, величина которого не определена. Кроме того, математическая структура системы (9) не содержит совершенно необходимой в случае управления АПР переменной — задания по уровню z_1. Поэтому в данном случае неэффективно преобразование базовой ММ 2-го порядка в ММ открытой системы с внешним управлением по аналогии с [14] построением макропеременной, играющей в схеме роль условной комбинированной ошибки регулирования в виде $x_\mu\left(z,x_1,x_2\right)=z-\left(x_1+\mu_2\cdot x_2\right)$, где μ_2 — коэффициент согласования ПС.

В связи с этими особенностями ММ ОУ целесообразно отказаться от исходной парадигмы подхода к синтезу квазиоптимального по быстродействию управления для объектов второго порядка, сформулированной в [13, 14]. Анализ уравнений (7–8) показывает, что можно задаться системой желаемых ДУ, распадающихся на два независимых нелинейных уравнения первого порядка вида, предложенного еще в [11, 12]:

$$\dot{x}_1 = \frac{d_m^H\cdot\left(z_1-x_1\right)}{\sqrt{\left(z_1-x_1\right)^2+\varepsilon_1^2}}, \tag{10}$$

$$\dot{x}_2 = \frac{d_m^C\cdot\left(z_2-x_2\right)}{\sqrt{\left(z_2-x_2\right)^2+\varepsilon_2^2}}, \tag{11}$$

где d_m^H, d_m^C — технологические ограничения на скорость изменения уровня и концентрации соответственно; z_1 — задание по уровню; z_2 — задание по концентрации; ε_1 и ε_2 — так называемая степень квазиоптимальности управления [12, 13].

Это тем более целесообразно, что обе ПС (и уровень x_1, и концентрация x_2) технологически независимы и быстродействие управления каждой из них желательно с точки зрения максимальной производительности АПР.

Отождествление правых частей уравнений (7) и (10) позволяет получить следующее промежуточное уравнение, связывающее оба технологически обусловленных управления с технологически обусловленной переменной состояния — уровнем x_1, технологически заданным его значением z_1 и производительностью АПР v_1:

$$u_1+u_2=\frac{d_m^H}{k_H}\cdot\frac{\left(z_1-x_1\right)}{\sqrt{\left(z_1-x_1\right)^2+\varepsilon_1^2}}+v_1. \tag{12}$$

Аналогично отождествление правых частей уравнений (8) и (11) позволяет получить другое промежуточное уравнение, связывающее оба технологически обусловленных управления с технологически обусловленной переменной состояния — концентрацией x_2, технологически заданным его значением z_2 и концентрацией сырьевого потока v_2:

$$u_1+u_2=\frac{u_1\cdot v_2}{x_2}-\frac{d_m^C}{k_H}\cdot\frac{x_1}{x_2}\cdot\frac{\left(z_2-x_2\right)}{\sqrt{\left(z_2-x_2\right)^2+\varepsilon_2^2}}. \tag{13}$$

Приравнивая правые части (12) и (13), можно выразить управление u_1 (сырьевой поток) в следующем виде:

$$u_1 = \frac{1}{v_2} \cdot \left[\frac{d_m^H}{k_H} \cdot x_2 \cdot \frac{(z_1 - x_1)}{\sqrt{(z_1 - x_1)^2 + \varepsilon_1^2}} + \frac{d_m^C}{k_H} \cdot x_1 \cdot \frac{(z_2 - x_2)}{\sqrt{(z_2 - x_2)^2 + \varepsilon_2^2}} + v_1 \cdot x_2 \right]. \quad (14)$$

Подстановка (14) в (12) позволяет получить выражение для второго управления u_2 (потока растворителя):

$$u_2 = \frac{d_m^H}{k_H} \cdot \frac{(z_1 - x_1)}{\sqrt{(z_1 - x_1)^2 + \varepsilon_1^2}} \cdot \left(1 - \frac{x_2}{v_2}\right) - \frac{d_m^C}{k_H} \cdot \frac{x_1}{v_2} \cdot \frac{(z_2 - x_2)}{\sqrt{(z_2 - x_2)^2 + \varepsilon_2^2}} + v_1 \cdot \left(1 - \frac{x_2}{v_2}\right). \quad (15)$$

Выражения (14) и (15) задают векторный закон управления (ЗУ) для АПР по каналам задания уровня и концентрации. Схема имитационного моделирования САУ АПР приведена на рис. 2, б. На этой схеме модель самого АПР представлена блоком (Subsystem) MM RPS.

Существенная нелинейность и структурная громоздкость векторного управления АПР $u = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$, сформированного в соответствии с парадигмой, заданной уравнениями (10–11), оправдывается тремя факторами.

1. Управление обеими переменными состояния (уровнем $H \overset{об}{=} x_1$ и концентрацией готового раствора $C \overset{об}{=} x_2$) осуществляется обоими управляющими воздействиями (сырьевым потоком раствора высокой концентрации $G_C \overset{об}{=} u_1$ и потоком растворителя $G_0 \overset{об}{=} u_2$). Таким образом обеспечивается максимальное использование ресурса управления (это важно в связи с существенным ограничением величины потока в реальном трубопроводе с реальным регулирующим органом).
2. Обе переменные технологического состояния x_1 и x_2 регулируются независимо друг от друга, т. е. процесс регулирования уровня не оказывает влияния на процесс стабилизации концентрации, и наоборот.
3. Обе переменные технологического состояния x_1 и x_2 регулируются и стабилизируются независимо от нагрузки на АПР $G \overset{об}{=} v_1$, которая представляет собой производительность аппарата, обеспечивающего раствором стабильной концентрации последующие аппараты технологической цепочки.

Эти свойства иллюстрируются рисунками 3, 4 и 5.

На верхнем скриншоте рис. 3 показана последовательная смена задания (Scope z 1) на уровень в АПР. На следующих двух скриншотах проиллюстрированы управляющие воздействия (Scope u 1, u 2), обеспечивающие смену уровня. Видно, что выход на новый уровень обеспечивается параллельным изменением смешиваемых потоков. Поэтому четвертый скриншот (Scope x1) показывает переходный процесс интенсивного изменения уровня, длящийся не более 2 минут, а последний (Scope x2) подтверждает обеспечение неизменности концентрации, т. к. векторный ЗУ $u = \begin{pmatrix} u_1 \\ u_2 \end{pmatrix}$ обеспечивает изменение потоков в пропорции, обусловленной заданной концентрацией.

На рис. 4 верхний скриншот (Scope z 2) показывает последовательную смену задания на концентрацию приготавливаемого раствора. Второй и третий скриншоты (Scope u 1, u 2) иллюстрируют соответствующие изменения управляющих воздействий. Четвертый скриншот (Scope x 1) подтверждает, что уровень при управлении концентрацией остается неизменным (управление обеспечивает одинаковые и противоположные по знаку изменения входных потоков). Последний скриншот (Scope x 2) демонстрирует переходный процесс изменения концентрации, также достаточно интенсивный.

Таким образом, имитационное моделирование процессов управления функционированием АПР по различным каналам подтвердило функциональность и эффективность исходной парадигмы автономного, квазиоптимального по быстродействию и согласованного управления технологическими переменными состояния.

На рис. 5 продемонстрирован эффект от введения в векторный ЗУ переменной v_1 - (Scope v 1). Управляющие воздействия u_1 и u_2 на экранах (Scope u 1) и (Scope u 2) меняются синхронно с нагрузкой v_1 и обеспечивают независимость технологического состояния аппарата от его производительности. Это иллюстрируют осциллограммы на экранах Scope x1 и Scope x2. Полученные в ходе аналитических исследований и преобразований, а также в ходе имитационного моделирования автоматической системы взаимно инвариантного векторного управления технологическим состоянием аппарата приготовления раствора результаты позволили сделать изложенные ниже выводы.

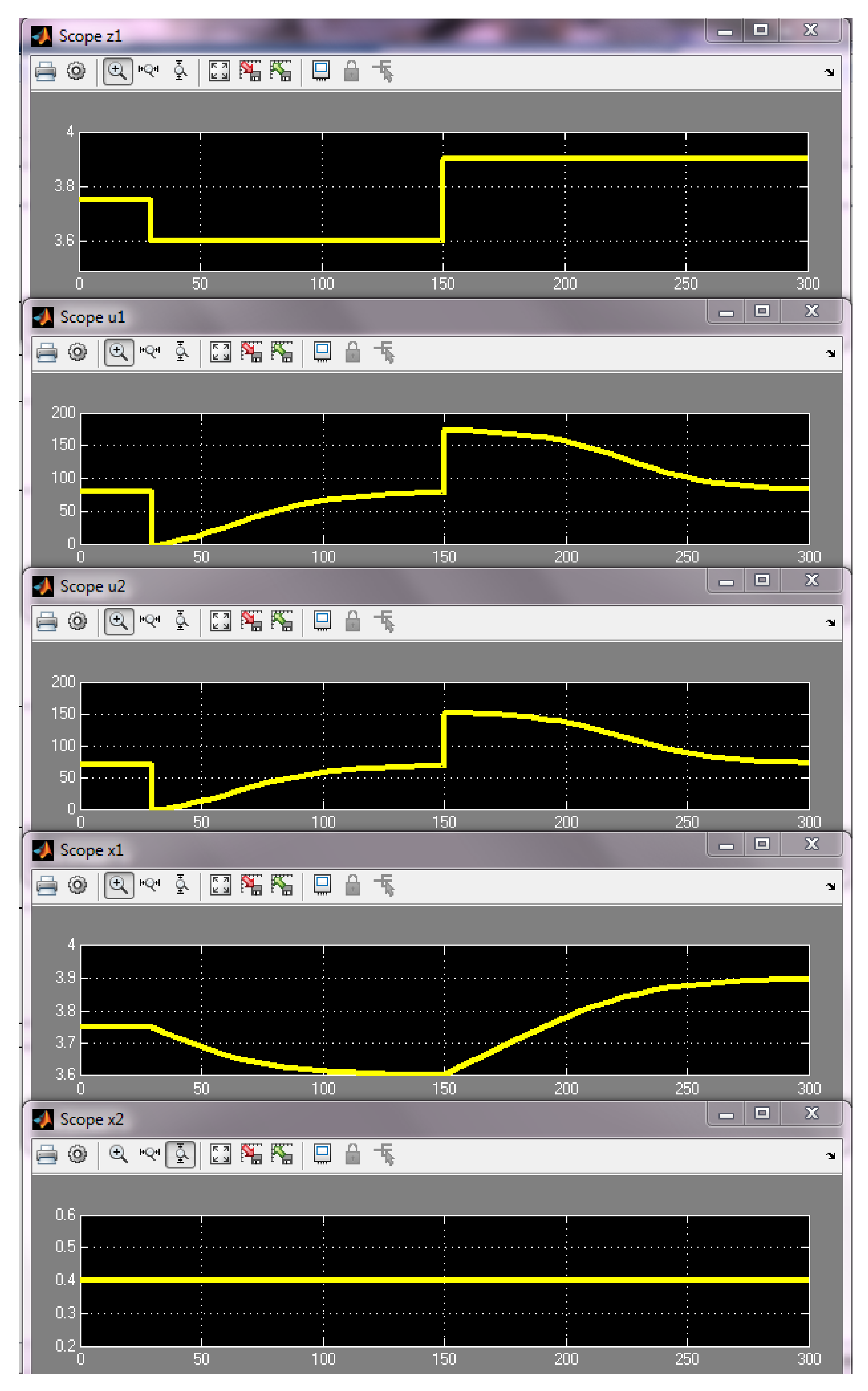


Рис. 3. Переходные процессы изменения уровня в АПР

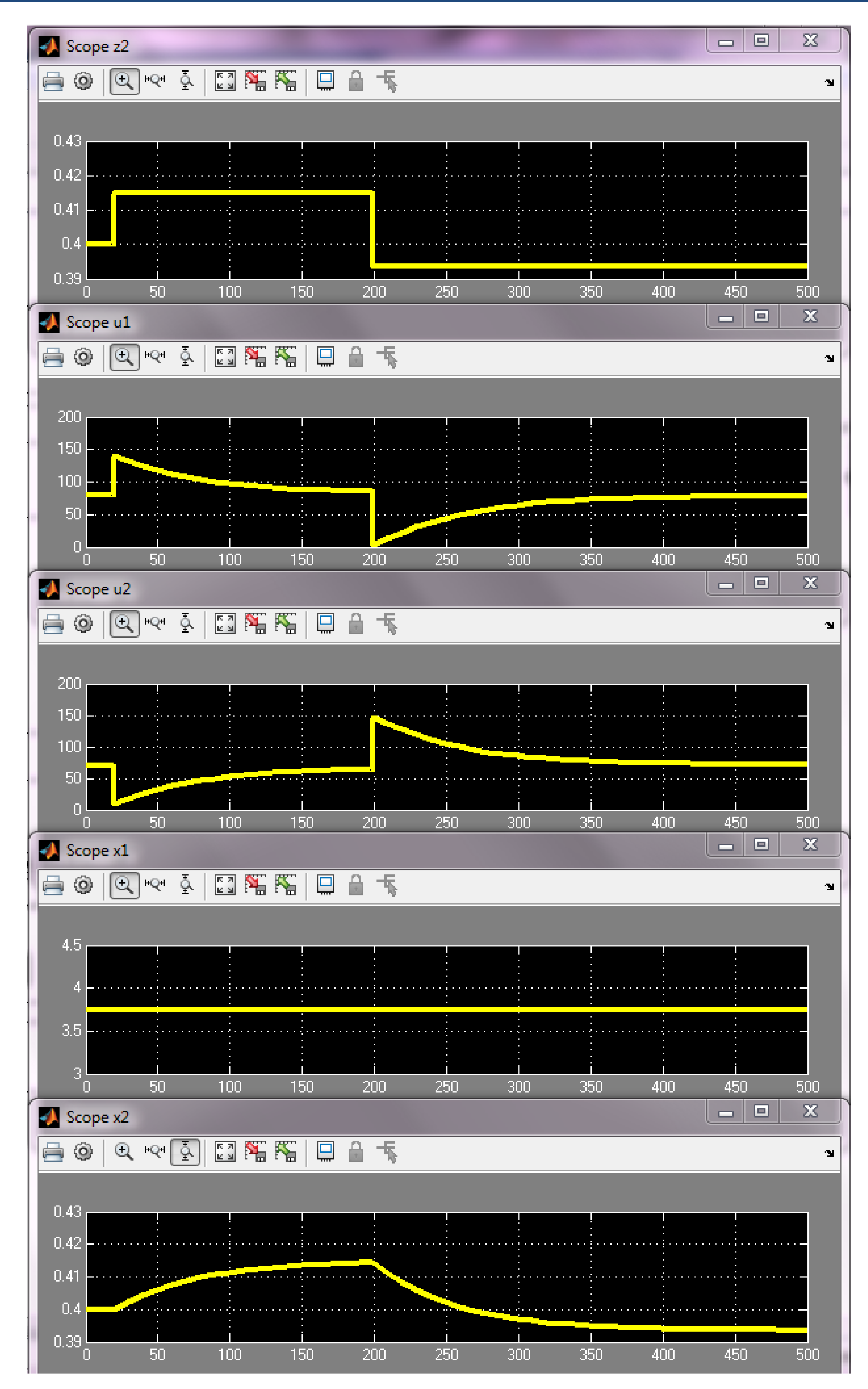


Рис. 4. Переходные процессы изменения концентрации в АПР

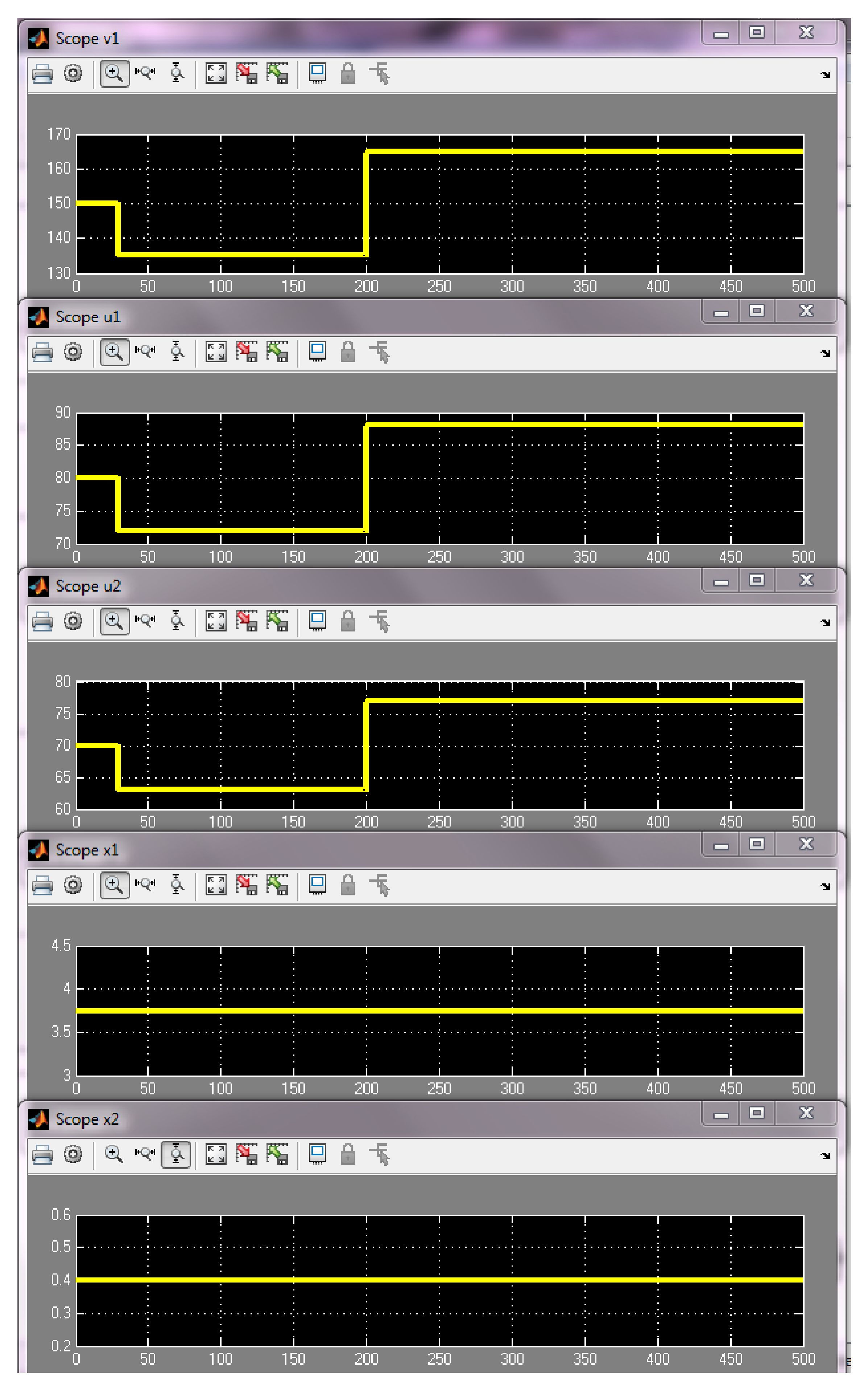


Рис. 5. Переходные процессы при изменении производительности АПР

Выводы.

1. Полученный в ходе проведенной работы векторный двухвходовый закон управления показал высокую эффективность решения задачи управления основными переменными технологического состояния аппарата приготовления раствора. Удалось достичь следующих результатов:

— более полное, по сравнению с одноконтурными системами регулирования, использование ресурса управления за счет одновременного и согласованного воздействия на управляемую переменную по каналам всех влияющих входов;

— обеспечение независимости контуров управления переменными технологического состояния аппарата приготовления раствора — как друг от друга, так и от внешних возмущений.

2. Сочетание идеологии синтеза законов управления на основе желаемых или эталонных математических моделей проектируемых систем с идеологией квазиоптимизации быстродействия управления можно считать перспективным подходом к задачам построения систем векторного управления многосвязными нелинейными объектами для обеспечения взаимной независимости и высокой интенсивности управления их переменными состояния.

Библиографический список

1. Фёдоров, А. Ф. Системы управления химико-технологическими процессами / А. Ф. Фёдоров, Е. А. Кузьменко. — Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2009. — 213 с.

2. Решетняк, Е. П. Системы управления химико-технологическими процессами / Е. П. Решетняк, А. К. Алейников, А. В. Комиссаров. — Саратов : Саратовский военный институт биологической и химической безопасности, 2008. — 416 с.

3. Беспалов, А. В. Системы управления химико-технологическими процессами / А. В. Беспалов. — Москва : Академкнига, 2007. — 690 с.

4. Бородин, И. Ф. Автоматизация технологических процессов / И. Ф. Бородин, Ю. А. Судник. — Москва : КолосС, 2004. — 344 с.

5. Нейдорф, Р. А. Теория автоматического управления в технологических системах : учебное пособие / Р. А. Нейдорф, Н. С. Соловей. — Ухта : Институт управления, информации и бизнеса, 2005. — 212 с.

6. Решетняк, Е. П. Электронный конспект лекций по дисциплине АСУТП / Е. П. Решетняк. — Саратов : СГАУ, 2009. — 213 с.

7. Нейдорф, Р. А. Моделирование химико-технологических процессов на микро-ЭВМ : учебное пособие / Р. А. Нейдорф, А. В. Ситников. — Новочеркасск : НПИ, 1986. — 88 с.

8. Нейдорф, Р. А. Инварианты объектов синергетического управления в химической технологии / Р. А. Нейдорф // Современная прикладная теория управления. Ч. III. Новые классы регуляторов технических систем / Под ред. А. А. Колесникова. — Таганрог : Изд-во ТРТУ, 2000. — С. 238–256.

9. Математическое моделирование химико-технологических процессов : учебное пособие / А. М. Гумеров [и др.]. — Казань : Изд-во Казанского государственного технологического университета, 2006. — 216 с.

10. Параметрическая идентификация трудноопределимых констант математических моделей автоматизированных систем участков магистральных газопроводов / Р. А Нейдорф [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2012. — № 2 (63), вып. 2. — С. 56–61.

11. Мохсен, М. Н. Синтез законов квазиоптимального управления технологическими объектами первого порядка [Электронный ресурс] / М. Н. Мохсен, Р. А Нейдорф // Инженерный вестник Дона. — 2015. — № 4. — Режим доступа: http://ivdon.ru (дата обращения: 15.01.16).

12. Нейдорф, Р. А. Нелинейное ускорение динамических процессов управления объектами первого порядка с учетом ограниченности воздействий / Р. А. Нейдорф // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 1999. — С. 13–21.

13. Синтез законов управления в технических системах : учебное пособие. Ч. 1. Инженерные методы синтеза законов управления в технических системах по эталонным математическим моделям / Р. А. Нейдорф [и др.] ; под общ. ред. Р. А. Нейдорфа, З. Х. Ягубова. — Ухта : УГТУ, 2000. — 168 с.

14. Нейдорф, Р. А. Инженерные методы синтеза автоматических систем управления : учебное пособие / Р. А. Нейдорф, Н. С. Соловей ; под общ. ред. Р. А. Нейдорфа. — Ухта : УГТУ ; Ростов-на-Дону : РГАСХМ, 2004. — 255 с.

15. Нейдорф, Р. А. Эффективная аппроксимация кусочных функций в задачах квазиоптимального по быстродействию управления / Р. А. Нейдорф // Математические методы в технике и технологиях — ММТТ-2000 : сб. тр. междунар. науч. конф. — Санкт-Петербург, 2000. — Т. 2. — С. 18–22.

16. Neydorf, R. Synthesis of Time Quasi-Optimal Asymptotically Stable Control Laws [Электронный ресурс] / R. Neydorf // SAE International. — 2015. — 15 сентября. — Режим доступа: http://papers.sae.org/2015-01-2481 (дата обращения: 20.01.16).

References

1. Fedorov, A.F., Kuzmenko, E.A. Sistemy upravleniya khimiko-tekhnologicheskimi protsessami. [Chemical Technological Process Control Systems.] Tomsk: Izd-vo Tomskogo politekhnicheskogo universiteta, 2009, 213 p. (in Russian).
2. Reshetnyak, E.P., Aleynikov, A.K., Komissarov, A.V. Sistemy upravleniya khimiko-tekhnologicheskimi protsessami. [Chemical Technological Process Control Systems.] Saratov: Saratov Military Institute of Radiological, Chemical, and Biological Defense, 2008, 416 p. (in Russian).
3. Bespalov, A.V. Sistemy upravleniya khimiko-tekhnologicheskimi protsessami. [Chemical Technological Process Control Systems.] Moscow: Akademkniga, 2007, 690 p. (in Russian).
4. Borodin, I.F., Sudnik, Y.A. Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov. [Process Automation.] Moscow: KolosS, 2004, 344 p. (in Russian).
5. Neydorf, R.A., Solovey, N.S. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya v tekhnologicheskikh sistemakh: uchebnoe posobie. [Automatic Control Theory in technological systems: teaching medium.] Ukhta: Institute of Management, Information and Business, 2005, 212 p. (in Russian).
6. Reshetnyak, E.P. Elektronnyy konspekt lektsiy po distsipline ASUTP. [Electronic lecture notes on Automatic Process Control Systems.] Saratov: SGAU, 2009. — 213 c. (in Russian).
7. Neydorf, R.A., Sitnikov, A.V. Modelirovanie khimiko-tekhnologicheskikh protsessov na mikro-EVM: uchebnoe posobie. [Modeling the chemical-technological processes at the micro-computer: teaching medium.] Novocherkassk: NPI, 1986, 88 p. (in Russian).
8. Neydorf, R.A. Invarianty ob"ektov sinergeticheskogo upravleniya v khimicheskoy tekhnologii. [Invariants of synergistic control objects in chemical technology.] Sovremennaya prikladnaya teoriya upravleniya. Ch. III. Novye klassy regulyatorov tekhnicheskikh system. [Modern applied management theory. Part III. New classes of technical system regulators.] Kolesnikov, A.A., ed. Taganrog: Izd-vo TRTU, 2000, pp. 238–256 (in Russian).
9. Gumerov, A.M., et al. Matematicheskoe modelirovanie khimiko-tekhnologicheskikh protsessov: uchebnoe posobie. [Mathematical modeling of chemical-technological processes: teaching medium.] Kazan: Izd-vo Kazanskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta, 2006, 216 p. (in Russian).
10. Neydorf, R.A., et al. Parametricheskaya identifikatsiya trudnoopredelimykh konstant matematicheskikh modeley avtomatizirovannykh sistem uchastkov magistral'nykh gazoprovodov. [Parametric identification of CAM system mathematical model hardly determinable invariables for gas main sections.] Vestnik of DSTU, 2012, no. 2 (63), iss. 2, pp. 56–61 (in Russian).
11. Mohsen, M.N., Neydorf, R.A. Sintez zakonov kvazioptimal'nogo upravleniya tekhnologicheskimi ob"ektami pervogo poryadka. [Synthesis of laws of quasioptimal control of technological objects of the first order.] Engineering Journal of Don, 2015, no. 4. Available at: http://ivdon.ru (accessed: 15.01.16) (in Russian).
12. Neydorf, R.A. Nelineynoe uskorenie dinamicheskikh protsessov upravleniya ob"ektami pervogo poryadka s uchetom ogranichennosti vozdeystviy. [Nonlinear acceleration of dynamic management processes by objects of the first order with the limited impact.] Vestnik of DSTU, 1999, pp. 13–21. (Upravlenie i diagnostika v dinamicheskikh sistemakh) [Management and Diagnostics in dynamical systems.] (in Russian).
13. Neydorf, R.A., et al. Sintez zakonov upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh: uchebnoe posobie. Ch. 1. Inzhenernye metody sinteza zakonov upravleniya v tekhnicheskikh sistemakh po etalonnym matematicheskim modelyam. [Synthesis of control laws in technical systems: teaching medium. Part 1: Engineering methods of control laws synthesis in technical systems based on reference mathematical models.] Neydorf, R.A., Yagubov, Z.K., eds. Ukhta: UGTU, 2000, 168 p. (in Russian).
14. Neydorf, R.A., Solovey, N.S. Inzhenernye metody sinteza avtomaticheskikh sistem upravleniya: uchebnoe posobie. [Engineering methods of synthesis of automatic control systems: teaching medium.] Neydorf, R.A, ed. Ukhta: UGTU; Rostov-on-Don: RGASKhM, 2004, 255 p. (in Russian).
15. Neydorf, R.A. Effektivnaya approksimatsiya kusochnykh funktsiy v zadachakh kvazioptimal'nogo po bystrodeystviyu upravleniya. [Effective approximation of piecewise functions in problems for quasi-optimal control speed.] Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh — MMTT-2000: sb. tr. mezhdunar. nauch. konf. [Mathematical methods in Engineering and Technologies – MMTT 2000: Proc.Int.Sci.Conf.] St. Petersburg, 2000, vol. 2, pp. 18–22 (in Russian).
16. Neydorf, R. Synthesis of Time Quasi-Optimal Asymptotically Stable Control Laws. SAE International, 2015. Available at: http://papers.sae.org/2015-01-2481 (accessed: 20.01.16).

Поступила в редакцию 21.11.2015
Сдана в редакцию 23.11.2015
Запланирована в номер 22.01.2016

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ
PROCESSES AND MACHINES OF AGRO - ENGINEERING SYSTEMS



УДК 631.363.7:62.01.57 DOI 10.12737/18277

Параметры сечения потоков циркуляции смешиваемых кормов в наклонном одношнековом порционном смесителе*

В. Ф. Хлыстунов[1], С. В. Брагинец[2], М. В. Чернуцкий[2], А. Н. Токарева[3]**

[1]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

[2]Северо-Кавказский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства, г. Зерноград, Российская Федерация

[3] Донской аграрный университет, г. Зерноград, Российская Федерация.

Loop flow section conditions of the mixable feed in tilted single-screw batch mixer ***

V. F. Khlystunov[1], C. V. Braginets[1], M. V. Chernutskiy[1], A. N. Tokareva[2]**

[1]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation.

[2]North Caucasian Research Institute of Agricultural Engineering and Electrification of Agriculture, Zernograd, Russian Federation

[3] Don Agrarian University, Zernograd, Russian Federation

Представлена математическая модель процесса смешивания кормов в порционном циркуляционном наклонном одношнековом смесителе. Модель включает в себя систему уравнений изменения концентрации контрольного ингредиента в характерных зонах смесителя. Для решения системы уравнений рассмотрено состояние кормового материала в период начала загрузки смесителя и начала обрушения. Приведены схема и математические выражения сил, действующих на корм в процессе загрузки. В результате решения уравнений получена зависимость для определения высоты слоя корма от геометрических параметров бункера смесителя и физико-механических свойств кормового материала. Показана схема сил, действующих на кормовой материал в начале процесса обрушения. С учетом зависимости, полученной для первого состояния корма, определена величина высоты слоя обрушиваемого материала. Определено, что из первоначальной зоны условного вытеснения формируется две зоны. Одна — зона идеального вытеснения в направлении транспортирования корма снизу вверх и вторая — зона идеального вытеснения в направлении обрушения корма сверху вниз. Площади поперечного сечения данных зон могут быть определены на основе выведенных уравнений.

Ключевые слова: смеситель, шнек, кормовой материал, угол наклона, зона условного вытеснения, зона идеального смешивания, высота слоя, коэффициенты внутреннего и внешнего трения.

A mathematical model of the feed mixing in a tilted single-screw circulating batch mixer is presented. The model includes a system of equations of control component concentration change in the representative zones of the mixer. The feed material state at the mixer loading start-up and hulling onset is considered for solving a system of equations. A flow pattern and mathematical expressions of the forces affecting the feed during the charging process are given. As a consequence of the equations solution, the dependence for determining the height of the feed layer on the mixer hopper geometrics and the physical and mechanical- and physical properties of the feed material is obtained. A flow pattern of the forces affecting the feed material at the hulling onset is shown. The layer height value of the hulled material is determined with account of the dependence obtained for the first state of feed. It is determined that two zones are formed from the area of the original conditional displacement. The first one is a plug-flow zone of the bottom-up feed transportation, and the second one is a plug-flow zone in the direction of the downward feed hulling. The cross-sectional area of these zones can be determined on the basis of the derived equations.

Keywords: mixer, auger, feed material, tilt angle, conditional displacement area, area of ideal mixing, layer height, coefficients of internal and external friction.

Введение. Многолетними и многочисленными исследованиями, проведенными в СКНИИМЭСХ, была доказана целесообразность использования в технологических линиях приготовления кормов для различных видов животных порци-

* Работа выполнена по теме № 070–2014–0008 в рамках выполнения госзадания Минобрнауки России в части НИР.

** E-mail: vniptim@gmail.com, sbraginets@mail.ru, m1chaelc@yandex.ru, tanna_ing@mail.ru

*** The research is done on theme no. 070–2014–0008 within the frame of the government task of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation in R&D.

онных циркуляционных смесителей кормов со шнековыми рабочими органами [1–3]. В них нормируемый показатель качества процесса достигается на стадии конвективного смешивания, осуществляемого, в отличие от диффузионного смешивания, со значительно большей интенсивностью. Таким образом, эти смесители в несколько раз более производительны, чем смесители перераспределения или внедрения [4,5].

Одной из перспективных моделей циркуляционных смесителей является модель с наклонным бункером, внутри которого установлены один или два шнековых рабочих органа [6,7]. При этом наблюдается снижение энергоемкости процесса вследствие того, что принудительная подача смешиваемого материала на верхнем горизонтальном уровне заменяется гравитационным его осыпанием из верхней части бункера.

Обоснование математической модели. Как показали предварительные исследования одновального порционного циркуляционного наклонного смесителя (ОПЦНС), в нем возникают несколько ярко выраженных потоков циркуляции смешиваемых кормовых ингредиентов (рис.1) [7].

При описании процесса конвективного смешивания в таких смесителях для интерпретации в виде полного ориентированного графа циркуляции потоков используют математическую модель в виде системы уравнений изменения концентрации контрольного ингредиента (индикатора) в характерных зонах [1]. Процедуру смешивания в рассматриваемом смесителе можно представить следующим образом. В период загрузки кормовых ингредиентов (рис.1а) наблюдается заполнение межшнекового пространства шнека и движение слоя материала над ним (в межшнековом просвете) [1]. Тем самым формируется зона условного транспортирования 31. В момент осыпания корма на стыке основной и отбойной навивки шнека (граница зоны 23), он, за счет взаимодействия материала подаваемого основной навивкой и отбойным витком, расположенным в верхней части бункера, выталкивается вверх, формируя зону идеального смешивания 23. Затем начинается обрушение кормового материала, сформированного частью его из зон 31 и 23 (рис.1б).

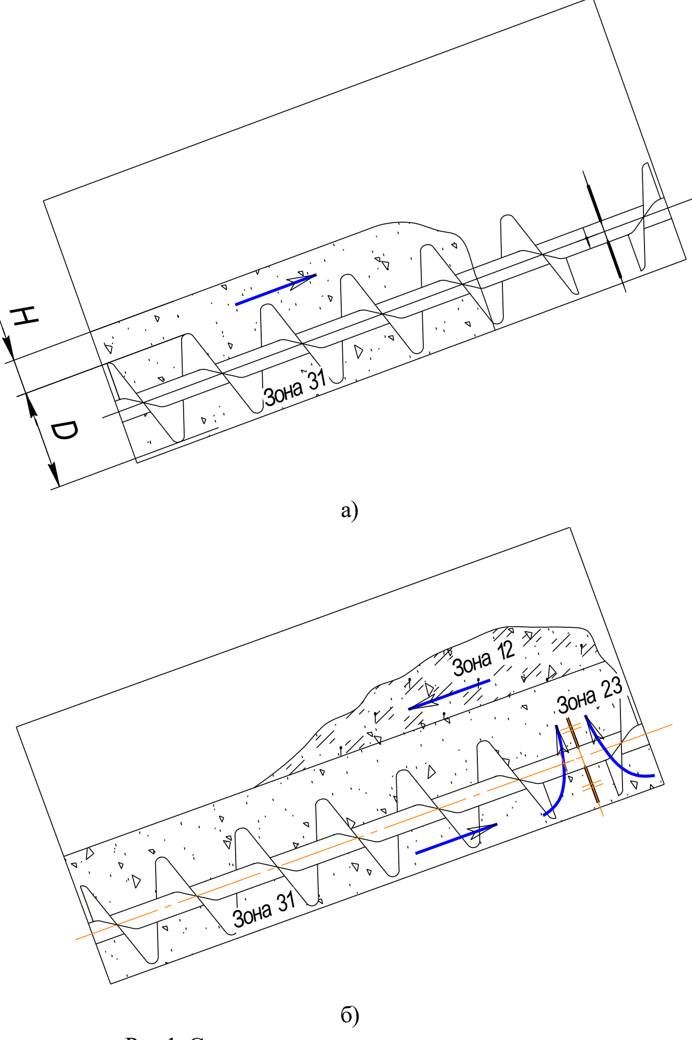


Рис.1. Состояние кормового материала в период начала загрузки смесителя (а) и начала обрушения (б)

При графовой интепретации порционных циркуляционных смесителей (по В. Ф. Хлыстунову) каждую характерную их зону представляют ребром полного ориентированного графа, которое принято обозначать индексом, состоящим из двух цифр. Первая из них — это вершина графа, откуда материал начинает двигаться, а вторая — зона, куда материал поступает. На этом рисунке 12 и 23 являются зонами идеального смешивания, а зона 31— идеального вытеснения.

На рис. 1а и 1б показана одна и та же зона. В период загрузки бункера формируется только одна зона — 31 (рис.1а). В стационарном режиме сформированы все зоны, характеризующие процесс в рассматриваемом смесителе (рис.1б).

Математическое описание процессов, протекающих в порционном циркуляционном смесителе можно представить для зоны идеального смешивания следующими образом:

$$T_{ij} \cdot \frac{dC_{ij}(t)}{dt} + C_{ij}(t) = \frac{\sum_{k=1}^{d-(i)} C_{ki}(t) \cdot Q_{ki}}{\sum_{k=1}^{d-(i)} Q_{ki}}, \quad (1)$$

где $C_{ij}(t)$, $C_{ki}(t)$ — соответственно текущее значение концентрации индикатора на ребре ij и на стоке j к вершине i;Q_{ki} — объемная производительность k-ого стыка к вершине i; $d(i)$ — полустепень захода вершины i; T_{ij} — постоянная времени зоны ij.

Аналогично для зоны идеального вытеснения:

$$C_{pm}(t) = \frac{\sum_{n=1}^{d-(i)} (t - T_{pm}) Q_{ni}}{\sum_{n=1}^{d-(i)} Q_{ni}}. \quad (2)$$

В этих формулах объемную производительность потоков определяют как

$$Q_{ki} = V_{ki} \cdot S_{ki}, \quad (3)$$

где V_{ki} — линейная скорость k-ого потока в направлении i-ого стока, м/с; S_{ki} — площадь поперечного сечения k-го потока корма в направлении i-го стока, м^2.

Математическая модель процесса смешивания в порционном смесителе. В рассматриваемом случае необходимо определить параметры сечений зон 12 и 31. Последняя складывается из диаметра шнека и слоя материала над ним. В момент загрузки это H.

Из рассмотрения первого состояние материала (рис. 2а) можно записать следующее неравенство:

$$F_a > F_1 + F_2 + F_{oc}, \quad (4)$$

где F_a — сила трения от действия материала над шнеком на нижележащий материал, H; F_1, F_2 — соответственно сила трения о правую и левую стенки бункера, H; F_{oc} — сила осыпания движущегося материала над шнеком, H.

Пользуясь методическим подходом [1], получили

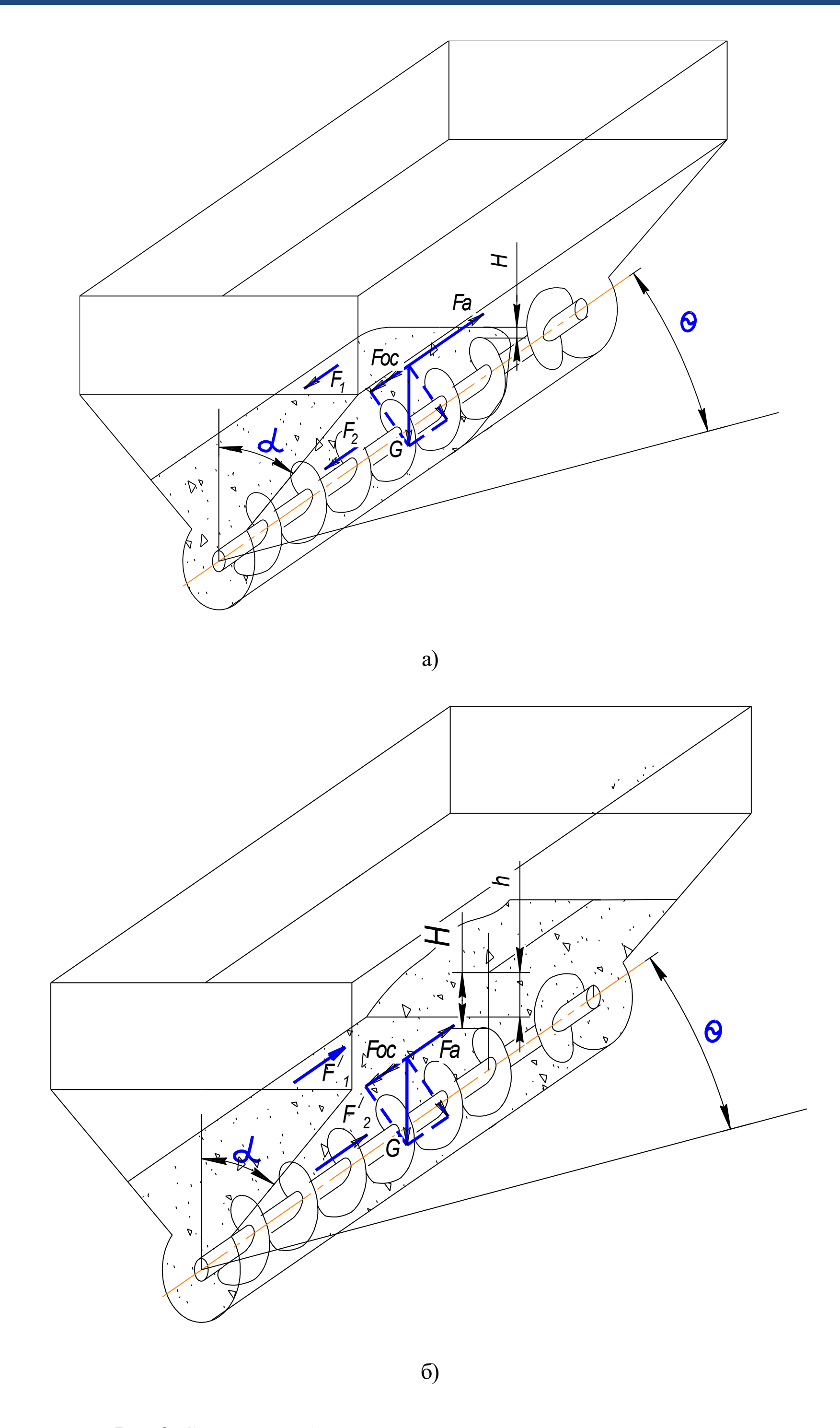
$$F_a = g \cdot \gamma \cdot D \cdot H \cdot L(1+k) \cdot f_м \cdot \cos\theta \quad (5)$$

Поскольку угол наклона стенок бункера в данном случае одинаков, то

$$F_1 = F_2 = 0{,}5 g \cdot \gamma \cdot H^2 \cdot L\left[1 + \frac{tg\alpha}{\cos(f_к + tg\alpha)}\right] \cdot f_к \cdot \cos\theta \quad (6)$$

$$F_{oc} = g \cdot \gamma \cdot D \cdot H \cdot L(1+k) f_м \cdot \sin\theta. \quad (7)$$

Здесь D — диаметр шнека, м; $f_м$, $f_к$— соответственно коэффициенты внутреннего и внешнего трения кормосмеси (о стенки бункера); α — угол наклона боковой стенки бункера к вертикали, град; θ — угол наклона бункера смесителя к горизонту, град; k — безразмерный эмпирический коэффициент доли зазоров между шнеком и кожухом от диаметра шнека, м; H — высота слоя материала над шнеком в момент начала его транспортирования, м; γ — средняя насыпная плотность кормового материала, кг/м^3; g — ускорение свободного падения.



а)

б)

Рис. 2. Схема сил, действующих на материал в зоне межшнекового просвета (а) и в зоне осыпания (б)

Решая совместно уравнения (4–7), получаем

$$H < \frac{D(1+k)(\cos\theta - \sin\theta)\cdot f_м}{\left[1 + \dfrac{tg\alpha}{cos\alpha\left(f_к + tg\alpha\right)}\right]\cos\theta \cdot f_к} \qquad (8)$$

Из рассмотрения второго состояния (рис. 2б), можно записать следующее неравенство:

$$F_{ос} + F_1 + F_2 > F_1^{/} + F_2^{/} + F_a \qquad (9)$$

Формулы для сил, входящих в (9), будут аналогичны (5–7). Однако вместо H следует записать h, т.е. величину высоты слоя обрушиваемого материала (высоту зоны идеального смешивания 12). Тогда неравенство (9) примет следующий вид

$$g\cdot\gamma\cdot D\cdot H\cdot L(1+k)f_м\cdot\sin\theta+g\cdot\gamma\cdot H^2\cdot L\left[1+\frac{tg\alpha}{\cos\alpha(f_к+tg\alpha)}\right]\cdot f_к\cdot\cos\theta>$$
$$>g\cdot\gamma\cdot D\cdot h\cdot L(1+k)f_м\cdot cos\theta+g\cdot\gamma\cdot h^2\cdot L\left[1+\frac{tg\alpha}{\cos\alpha(f_к+tg\alpha)}\right]\cdot f_к\cdot\cos\theta \quad (10)$$

Подставив в (10) высоту слоя H из выражения (8), после соответствующих преобразований получили выражение вида:

$$Ah^2+Bh-C<0, \quad (11)$$

где

$$A=\left[1+\frac{tg\alpha}{cos\alpha(f_к+tg\alpha)}f_к\cdot\cos\theta\right], \quad (12)$$

$$B=D(1+k)f_м\cdot\cos\theta, \quad (13)$$

$$C=\frac{D^2(1+k)^2(\cos\theta-\sin\theta)f_м^2\cdot\cos\theta}{A}. \quad (14)$$

Решение квадратичного уравнения провели применительно к кормосмеси для свиней, физико-механические свойства которой были выявлены в результате ранее проведенных исследований [8,9] и представлены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета

Обозначение	Значение
Угол наклона бункера к горизонту θ, град	20
Угол наклона стенки бункера α, град	35
Коэффициент трения кормосмеси о поверхность бункера, $f_к$	0,34
Коэффициент внутреннего трения кормосмеси, $f_м$	0,6
Безразмерный эмпирический коэффициент доли зазоров между шнеком и кожухом, k	0,1

Заключение. По результатам расчетов получили следующие зависимости:

– высота слоя материала выбранной кормосмеси над шнеком в момент его выталкивания в соответствии с выражением (8) должна находиться в пределах

$$H<0,678D, \quad (15)$$

– высота слоя обрушиваемого материала должна соответствовать неравенству

$$h<0,47D. \quad (16)$$

Полученные зависимости позволяют объяснить сущность процесса смешивания в смесителе рассматриваемого типа. При этом из первоначальной зоны 31 условного вытеснения формируется две зоны. Первая — зона идеального смешивания в направлении транспортирования корма снизу вверх с высотой сечения $H–h$, вторая — зона идеального вытеснения в направлении обрушения корма сверху вниз с высотой сечения h.

Библиографический список

1. Хлыстунов, В. Ф. Совершенствование технического оснащения системы жизнеобеспечения свиней / В. Ф. Хлыстунов. — Зерноград : ВНИПТИМЭСХ, 2009. — 232с.
2. Кормановский, Л. П. Механико-технологические основы точных технологий приготовления и раздачи кормов КРС многофункциональными агрегатами / Л. П. Кормановский, М. А. Тищенко. — Москва : РАСХН, 2000 — 344с.
3. Максименко, В. А. Исследование процесса смешивания и выдачи кормов раздатчиком-смесителем на откормочных площадках крупного рогатого скота вместимостью до 30 тыс. скотомест : Дис. … канд.техн. наук. / В. А. Максименко. — Зерноград, 1982. — 175 с.
4. Макаров, Ю. И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю. И. Макаров. — Москва : Машиностроение, 1973. — 215 с.
5. Paul EdwardL. Handbook of industrial mixing : science and practice/ EdwardL. Paul, Victor A. Atiemo-Obeng, Suzanne M. Kresta. – Hoboken, New Jersey: JohnWiley& Sons, Inc., 2004. – 1432 p.
6. Хлыстунов, В. Ф. Моделирование процесса смешивания кормов в шнековом смесителе с наклонным бункером / В. Ф.Хлыстунов, И. И. Тищенко, А. Н. Токарева, Б. А. Карташов // Вестник РАСХН. — 2007. — №4. — с.13–15.

7. Хлыстунов, В. Ф. Модель процесса смешивания кормов в порционном наклонном однощнековом смесителе / В. Ф. Хлыстунов, С. В. Брагинец, М. В. Чернуцкий, А. Н. Токарева, Т. М. Чередниченко // Инновационное развитие АПК России на базе интеллектуальных машинных технологий : сб. науч. докл. междунар. науч.-техн. конф. / ФГБНУ ВИМ — Москва, 2014 — с.41–45.

8. Пахомов, В. И. Технологии и технические средства для производства полнорационных кормосмесей в условиях автономных сельхозпредприятий / В. И. Пахомов, А. В. Смоленский, П. А. Чапский. — Зерноград : ГНУ СКНИИМЭСХ, 2010. — 112с.

9. Правила организации и ведения технологических процессов производства продукции комбикормовой промышленности. — Воронеж : ВНИИКП, 1997. — 256 с.

References

1. Khlystunov, V.F. Sovershenstvovanie tekhnicheskogo osnashcheniya sistemy zhizneobespecheniya sviney. [Improving the equipment of the life support system for pigs.] Zernograd: VNIPTIMESKh, 2009, 232 p. (in Russian).

2. Kormanovskiy, L.P., Tishchenko, M.A. Mekhaniko-tekhnologicheskie osnovy tochnykh tekhnologiy prigotovleniya i razdachi kormov KRS mnogofunktsional'nymi agregatami. [Mechanical and technological backgrounds for precision technologies of preparation and distribution of cattle feed by multifunctional units.] Moscow: RASKhN, 2000, 344 p. (in Russian).

3. Maksimenko, V.A. Issledovanie protsessa smeshivaniya i vydachi kormov razdatchikom-smesitelem na otkormochnykh ploshchadkakh krupnogo rogatogo skota vmestimost'yu do 30 tys. skotomest : Dis. … kand.tekhn. nauk. [Study on mixing and dispensing feed by the dispenser-mixer on the feedlot for up to 30 thousand cattle stalls: Cand.Sci. (Eng.) diss.] Zernograd, 1982, 175 p. (in Russian).

4. Makarov, Y.I. Apparaty dlya smesheniya sypuchikh materialov. [Bulkblending devices.] Moscow: Mashinostroenie, 1973, 215 p. (in Russian).

5. Paul, Edward L., Atiemo-Obeng, Victor A., Kresta, Suzanne M. Handbook of industrial mixing: science and practice. Hoboken, New Jersey: JohnWiley& Sons, Inc., 2004, 1432 p.

6. Khlystunov, V.F., Tishchenko, I.I., Tokareva, A.N., Kartashov, B.A. Modelirovanie protsessa smeshivaniya kormov v shnekovom smesitele s naklonnym bunkerom. [Simulation of feed mixing in the screw mixer with a sloping hopper.] Vestnik RASKhN, 2007, no. 4, pp. 13–15 (in Russian).

7. Khlystunov, V.F., Braginets, S.V., Chernutskiy, M.V., Tokareva, A.N., Cherednichenko, T.M. Model' protsessa smeshivaniya kormov v portsionnom naklonnom odnoshchnekovom smesitele. [Model of feed mixing process in a sloping single-screw batch mixer.] Innovatsionnoe razvitie APK Rossii na baze intellektual'nykh mashinnykh tekhnologiy: sb. nauch. dokl. mezhdunar. nauch.-tekhn. konf. [The innovative development of Russian agro-industrial complex on the basis of intelligent machine technologies: Proc. Int. Sci. Eng. Conf.] FGBNU VIM, Moscow, 2014, pp. 41–45 (in Russian).

8. Pakhomov, V.I., Smolenskiy, A.V., Chapskiy, P.A. Tekhnologii i tekhnicheskie sredstva dlya proizvodstva polnoratsionnykh kormosmesey v usloviyakh avtonomnykh sel'khozpredpriyatiy. [Technologies and facilities for the of TMR manufacture at the autonomous farms.] Zernograd: GNU SKNIIMESKh, 2010, 112 p. (in Russian).

9. Pravila organizatsii i vedeniya tekhnologicheskikh protsessov proizvodstva produktsii kombikormovoy promyshlennosti. [Management of product manufacturing process flow of the feed mill industry.] Voronezh: VNIIKP, 1997, 256 p. (in Russian).

Поступила в редакцию 20.10.2015
Сдана в редакцию 23.10.2015
Запланирована в номер 22.02.2016

ПРОЦЕССЫ И МАШИНЫ АГРОИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМ
PROCESSES AND MACHINES OF AGRO - ENGINEERING SYSTEMS



УДК 620.179.17-715.6 DOI 10.12737/18278

Метрологические аспекты параметров акустической эмиссии при мониторинге разложения пероксида водорода[*]

В. Л. Гапонов[1], Д. М. Кузнецов[2], М. С. Захарова[3]**
[1, 2, 3]Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация

Metrological aspects of acoustic emission conditions under hydrogen peroxide decomposition monitoring[***]

V. L. Gaponov[1], D. M. Kuznetsov[2], M. S. Zakharova[3]**
[1, 2, 3]Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russian Federation

Целью настоящей работы являлось изучение метрологических аспектов метода акустической эмиссии (АЭ) применительно к мониторингу скорости разложения пероксида водорода. Проведен выбор измеряемого параметра АЭ, определяющего метрологические свойства метода в целом. Установлено, что процесс разложения пероксида водорода вызывает волны напряжения в локальном объеме жидкости. Это приводит к образованию акустических сигналов, позволяющих надежно контролировать процесс методом АЭ. Проанализирована метрологическая оценка метода, реализуемая в два этапа. Определена важность первого этапа, позволяющего проводить качественные относительные АЭ-исследования. Выполненные эксперименты подтвердили факт высокой чувствительности предложенного способа. Таким образом, можно проводить эффективные относительные исследования сравниваемых процессов по параметрам АЭ. Акустико-эмиссионные данные показывают, что инструментальные и методические погрешности метода АЭ в целом могут быть существенными при несоблюдении идентичных условий, и этот факт может быть ориентиром для дальнейших исследований.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, химические реакции в жидкости, пероксид водорода, метрологическая оценка, суммарный счет акустических сигналов, систематические и случайные погрешности.

The work objective is to study the metrological aspects of the acoustic emission (AE) method as applied to the monitoring of the hydrogen peroxide decay rate. The AE changing parameter that determines the method metrological properties as a whole is selected. It is established that the process of the hydrogen peroxide decomposition causes stress waves in the local liquid volume. This leads to the formation of the acoustic signals that allow firmly control this process through the AE method. The metrological evaluation of the method implemented in two stages is analyzed. The significance of the first stage allowing for the quality relative AE-research is identified. The experiments performed have confirmed high sensitivity of the proposed method. Thus, it is possible to carry out effective relative studies of the compared processes according to the AE parameters. The acoustic emission data show that instrumental and methodological errors of the AE method in general can be significant in case of the counter conditions, and this fact can be a benchmark for future research.

Keywords: acoustic emission, chemical reactions in liquid, hydrogen peroxide, metrological evaluation, total count of acoustic signals, systematic and random errors.

Введение. Сравнительно недавно зарегистрировано и описано явление акустической эмиссии (АЭ) для ряда физико-химических и химических процессов в жидкости [1–3]. Опубликована также теоретическая проработка достоверности регистрации явления АЭ в жидкости [4–6]. Таким образом, показана возможность и перспективность использования данного явления для исследования разнообразных физико-химических процессов, в том числе связанных с образованием газовой фазы в жидкости. Выделение растворенных газов в жидкости, химический распад системы с образованием газовой фазы приводят к индуцированию акустических сигналов в ультразвуковом диапазоне частот.

Образование пузырька выделяемого газа (в данном случае — кислорода) проходит различные стадии, что вызывает волны напряжения в локальном объеме жидкости. В силу повторяемости данного явления, образующиеся аку-

[*] Работа выполнена в рамках инициативной НИР.
[**] E-mail: v.gaponov6591@yandex.ru, kuznetsovdm@mail.ru, Zaharshuk@mail.ru
[***] The research is done within the frame of the independent R&D.

стические сигналы имеют достаточную энергию, превышающую порог восприятия акустического тракта ультразвуковых пьезодатчиков, что позволяет надежно контролировать процесс [7].

В то же время остается открытым вопрос о сходимости и воспроизводимости предлагаемого метода при разложении пероксида водорода. Безусловно, данное обстоятельство представляет интерес с точки зрения возможности использования метода АЭ (физического) для количественного химического анализа. В данном случае решающим фактором служит метрологическая оценка рассматриваемого метода.

Количественный химический анализ, целью которого является измерение концентрации различных веществ в объектах, представляет собой отдельную область метрологии [8]. Прежде всего следует отметить, что конечной стадией количественного химического анализа практически всегда является прямое измерение какой-либо не химической, а физической величины: массы в гравиметрическом методе, оптических величин в спектральных методах или электромагнитных величин. Однако это измерение обычно не является определяющим с точки зрения общей погрешности результата анализа. В наибольшей степени общая погрешность зависит от стадии перевода полученных значений физических величин в требуемую химическую величину (концентрацию, количество молей). С учетом этого обстоятельства результат количественного химического анализа рассчитывают с использованием эмпирически определяемой градуировочной зависимости, связывающей аналитический сигнал (результат измерения той или иной физической величины) с концентрацией или количеством вещества. Следовательно, количественный химический анализ на самом деле представляет собой косвенное измерение. Аналогичная процедура является обязательной и для метода АЭ, если он используется при количественном химическом анализе в процессе разложения пероксида водорода.

Таким образом, метрологическая оценка метода АЭ применительно к определению химических величин (концентрации и количества вещества) состоит из двух независимых этапов работ.

1. Определение (с последующим устранением) основных причин возникновения систематических и случайных погрешностей измерений сигналов акустической эмиссии, сопровождающих процесс разложения пероксида водорода. Этот этап является основным, поскольку без определения и устранения погрешностей измерений сигналов акустической эмиссии второй этап может стать бессмысленным. Чаще всего достаточно проводить относительные измерения параметров АЭ процесса. При этом во втором этапе нет необходимости.

2. Получение градуировочной зависимости, связывающей аналитический сигнал (параметр АЭ) с концентрацией, изменением концентрации или количеством вещества, а также метрологическая оценка такой зависимости.

Итак, целью настоящей работы является исследование первого этапа метрологической оценки метода АО — изучение метрологических аспектов данного метода при измерении сигналов акустической эмиссии применительно к мониторингу скорости разложения пероксида водорода.

Основная часть. Очевидно, что выбор измеряемого параметра АЭ определяет метрологические свойства метода в целом. Следует отметить, что информативный параметр АЭ-контроля определяется его целью. В первую очередь учитывается связь параметра АЭ и параметров процесса сольватации. При этом необходимо выбирать измеряемую величину, дающую максимум информации, удобную для выделения и обработки, устойчивую по отношению к возмущающим факторам. Под устойчивостью параметра сигнала АЭ следует понимать его способность сохранять статистическое распределение измеряемой величины неизменным или изменяющимся в допустимых пределах при определенных изменениях условий, влияющих на измерения. Таким образом, наиболее целесообразно в данном случае применять статистические закономерности распределения во временной области параметров АЭ: энергия, амплитуда сигналов, активность, суммарный счет импульсов.

Методика и метрология регистрации сигналов АЭ, сопровождающих физико-химические процессы в жидкости, ранее рассмотрена только применительно к процессам сольватации твердых веществ [9–11]. При этом особое внимание в данных работах уделяется феноменологии процесса и динамике изменения при сольватации различных параметров АЭ.

Ранее были рассмотрены основные причины возникновения погрешностей при проведении акустико-эмиссионных измерений [10]. Погрешность может зависеть от условий проведения измерений, методики (методическая систематическая погрешность), применяемых технических средств (инструментальная систематическая погрешность). К последним можно отнести, в частности, непостоянные характеристики пьезодатчика, переменные характеристики веществ. При использовании акустико-эмиссионных комплексов погрешности могут быть связаны с программной обработкой акустического сигнала. Кроме того, важный фактор возникновения инструментальной систематической погрешности — акустические характеристики материала емкости. Также появляется задача обеспечения стабильного акустического контакта «емкость — пьезодатчик». При этом имеют значение такие параметры, как форма емкости, месторасположение зоны катализа в емкости, обеспечение неизменных температурных условий и т. д.

Кроме систематической погрешности следует иметь в виду возможные грубые погрешности измерений (промахи). Их наличие искажает x_i (значение активности АЭ в момент времени t_i), σ (разброс значений активности АЭ), а также доверительный интервал. Очевидно, что совершенно необходимо исключить такие промахи. С этой це-

лью был произведен расчет по критериям Романовского и 3σ. Доверительная вероятность — 0,95. Очищенные от грубых промахов экспериментальные данные по активности АЭ представлены на рис. 1.

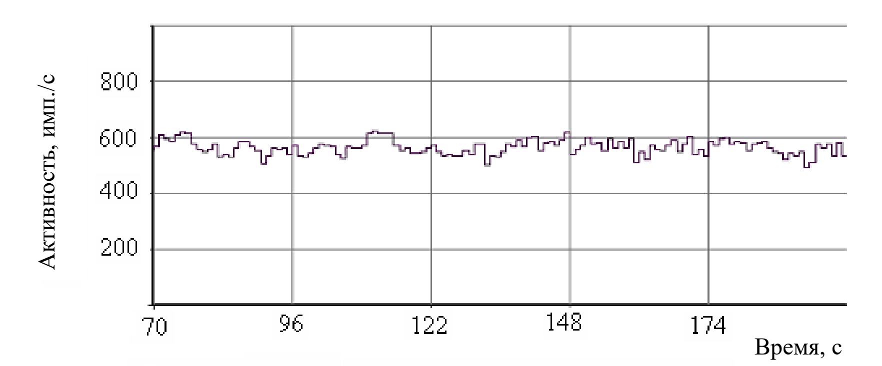


Рис. 1. Изменение активности АЭ при разложении пероксида водорода

Следует заметить, что исключение случайных погрешностей при измерении сигналов АЭ невозможно в принципе, в том числе и при измерении процессов, имеющих место в жидкой среде. Для снижения их влияния и получения более достоверных результатов измерения проводятся многократно, результаты наблюдений обрабатываются, и за опорное значение принимается общее среднее значение (математическое ожидание). Для расчета опорного значения используется уравнение изменения значений активности АЭ в зависимости от времени. Получение этого уравнения представляет собой самостоятельную задачу, решаемую в несколько этапов. На первом этапе очищенные от грубых промахов параметры активности АЭ формируют кривую суммарного счета импульсов АЭ. В работах [5, 6] указывается, что процесс разложения пероксида водорода сопровождается импульсами АЭ, и кривая изменения суммарного счета импульсов АЭ может быть описана уравнением общего вида.

Скорость разложения пероксида водорода в каждый момент времени прямо пропорциональна его неразложившемуся количеству. Скорость разложения пероксида водорода измеряется его количеством, распавшимся в единицу времени. За малый промежуток времени Δt, истекший с некоторого момента времени t, количество разложившейся перекиси водорода равно $km\Delta t$, где m — масса неразложившейся перекиси водорода в данный момент, k — коэффициент пропорциональности. Это же количество, взятое с отрицательным знаком (масса убывает), равно изменению массы за время Δt:

$$\Delta m = -km\Delta t \tag{1}$$

Обе части равенства (1) делим на Δt и переходим к пределу при $\Delta t \to 0$.

Тогда:

$$Lim\frac{\Delta m}{\Delta t} = \frac{dm}{dt} = -km\,. \tag{2}$$

Таким образом, равенство (2) представляет дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными. Разделим переменные, после чего выполним интегрирование и получим:

$$t = t_0 e^{-kt} \tag{3}$$

Коэффициент k можно определить из известных данных [11]: за промежуток времени, равный одному часу, при применении катализатора диоксида марганца из 3 % раствора разлагается 70 % пероксида водорода. Таким образом, при t = 60 мин $m = 0{,}7m_0$. Искомая функция:

$$t = t_0 e^{-0.05945t} \tag{4}$$

Количество разложившегося пероксида водорода в процентном выражении, соответственно, будет выражаться функцией:

$$M = (t_0 - t)/t_0 100\% \tag{5}$$

или

$$M = t_0(1 - e^{-0,005945t})/t_0 100\%$$

Динамика процесса разложения пероксида водорода после добавления катализатора представлена на рис. 2.

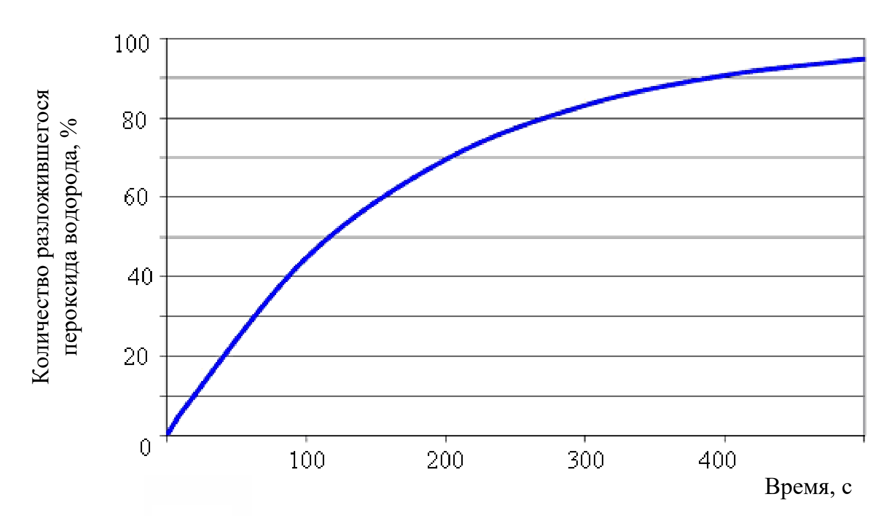


Рис. 2. Расчетная кривая изменения количества оставшегося в растворе пероксида водорода после добавления катализатора

Важным метрологическим параметром является чувствительность метода. Проведенные эксперименты подтвердили факт высокой чувствительности предложенного способа. При разложении пероксида водорода с добавлением в качестве катализатора серебра (10 мг на 400 мл 3-процентного раствора пероксида водорода) процесс выделения газообразного кислорода наблюдается в течение 48 часов. Выявление изменений в процессе на протяжении всего 30 минут в этом случае представляет собой сложную задачу (рис. 3).

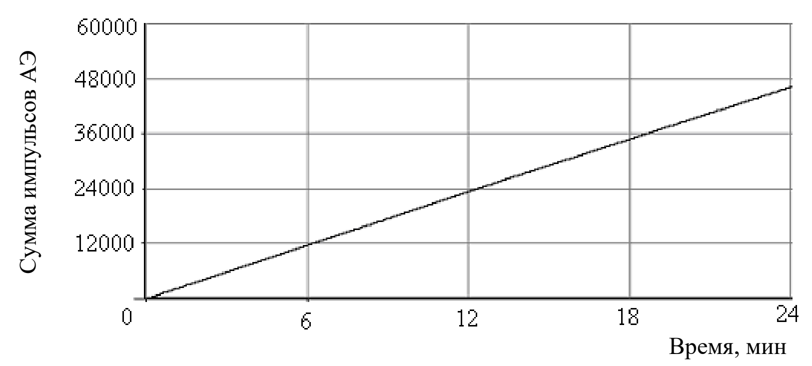


Рис. 3. Изменение суммы импульсов АЭ в начальной стадии процесса

Однако даже в случае видимой линейности изменения количества сигналов детальные исследования все равно выявляют экспоненциальную картину нарастания суммарного счета АЭ (табл 1).

Таблица 1

Изменение количества импульсов АЭ в начальной стадии процесса по 5-минутным интервалам

Время эксперимента, мин	Количество импульсов АЭ	
	Суммарное	За 5 минут наблюдения
5	9719	9719
10	19435	9716
15	29053	9618
20	38573	9520
25	48032	9459
30	57426	9394

Полученные данные могут быть представлены графически (рис. 4).

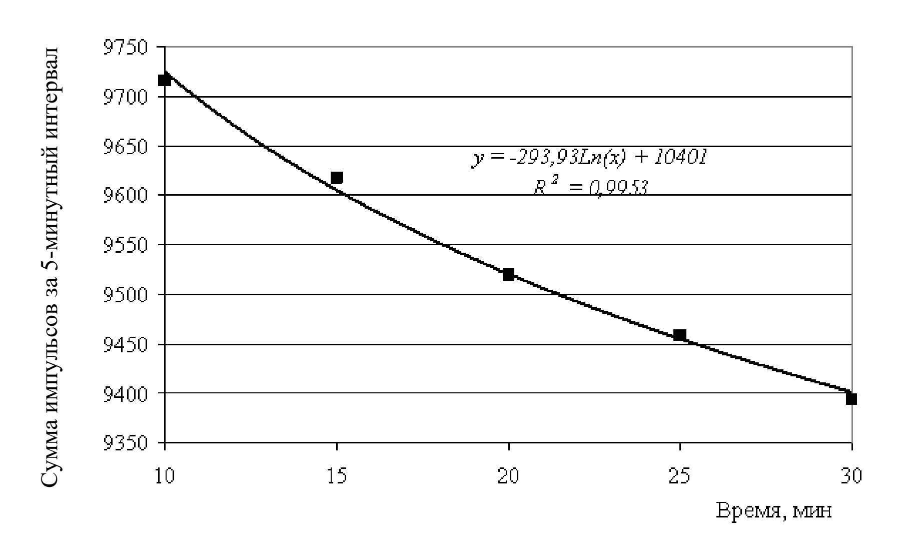


Рис. 4. Изменение количества импульсов АЭ

Рис. 4 иллюстрирует экспоненциальный характер уменьшения активности сигналов АЭ. Это, в свою очередь, означает постепенное уменьшение скорости разложения пероксида водорода за счет снижения его концентрации в растворе. Следовательно, чувствительность метода АЭ достаточно высока, поскольку метод достоверно отражает изменение концентрации на 1/48 × 1/12 = 1/576 измеряемой величины. Весь интервал измерения составляет 48 часов, или 576 5-минутных интервалов, а 5 минут — это 1/12 часа. Метод АЭ показывает, что за 5-минутный интервал достоверно наблюдается изменение суммы импульсов АЭ. В том случае, если начальную концентрацию принять за 100 %, относительная чувствительность метода АЭ окажется равной 100 % × 1/576 = 0,17 %.

Как указывалось выше, количество регистрируемых импульсов в целом соответствует количеству газовых пузырьков. Однако даже в случае неизменности количества регистрируемых сигналов метод АЭ позволяет идентифицировать практически каждый единичный акт движения газовых пузырьков. Так, в частности установлено, что варьируется длительность сигналов, их амплитуда, количество осцилляций и время нарастания (рис. 5).

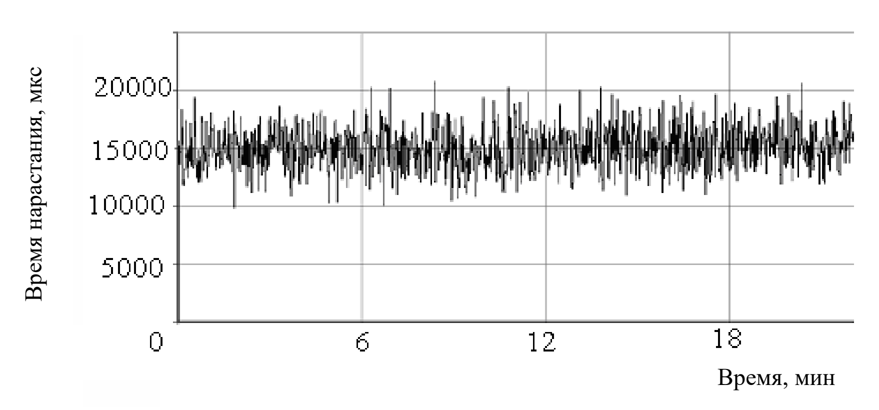


Рис. 5. Вариации времени нарастания сигналов АЭ

В то же время установлено, что наряду с высокой информативностью и чувствительностью метрологически важным обстоятельством предложенного метода могут стать недостаточные сходимость и воспроизводимость метода АЭ. Акустико-эмиссионное определение суммарного количества импульсов показывает, что при несоблюдении идентичности условий инструментальные и методические погрешности метода АЭ могут быть существенны — они достигают 10 %.

Выводы. Проведенное исследование показало возможность и перспективность использования метода АЭ для измерения сигналов акустической эмиссии применительно к мониторингу скорости разложения пероксида водорода, особенно при относительных исследованиях. Эксперименты подтвердили высокую чувствительность предложенного способа. Акустико-эмиссионные данные свидетельствуют, что возможности метода позволяют регистрировать изменения скорости разложения пероксида водорода на уровне 0,17 % от максимального значения концентраций. В то же время установлено, что погрешности могут достигать значительных величин, и данную проблему следует рассматривать как возможную задачу для дальнейших исследований.

Библиографический список

1. Builo, S. I. Acoustic_Emission Testing and Diagnostics of the Kinetics of Physicochemical Processes in Liquid Media / S. I. Builo, D. M. Kuznetsov // Russian Journal of Nondestructive Testing. — 2010. — Vol. 46, № 9. — P. 684–689.

2. Kuznetsov, D. M. Correlation Evaluation of the Acoustic Emission's Method the Tool of Exo Solvation Kinetik's Research / D. M. Kuznetsov, S. I. Bujlo, J. A. Ibragimova // Chemical Technology. — 2011. — Vol. 6, iss. 2. — P. 112–113.

3. Acoustic-Emission Testing and Diagnostics of the Dissolution Kinetics of Crystalline Components / S. I. Builo [et al.] // Russian Journal of Nondestructive Testing. — 2012. — Vol. 48, № 10. — P. 53–56.

4. Builo, S. I. Acoustic Emission Testing of Capillary Liquid Flows in Porous Media / S. I. Builo, D. M. Kuznetsov, V. L. Gaponov // Russian Journal of Nondestructive Testing. — 2014. — Vol. 50, № 7. — P. 19–23.

5. Acoustic studies of the decomposition of hydrogen peroxide process / D. M. Kuznetsov [et al.] // Настоящи изследвания и развитие — 2014. — София : Бял ГРАД-БГ, 2014. — Т. 25. — С. 73–76.

6. Метрологические аспекты мониторинга экологических процессов по параметрам акустической эмиссии / Д. М. Кузнецов [и др.] // Kluczowe aspekty naukowej dzialalnosci — 2014 : materialy X miedzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji. — Przemysl : Nauka i studia, 2014. — Vol. 19. — S. 44–50.

7. Builo, S. I. Acoustic Emission Diagnostics of the Kinetics of Physicochemical Processes in Liquid and Solid Media / S. I. Builo, D. M. Kuznetsov, V. L. Gaponov // Advanced Materials. Studies and Applications / ed. I. A. Parinov, Shun-Hsyung Chang, Somnik Theerakulpisut. — New York : Nova Science Publishers, 2015. — 527 p.

8. Дворкин, В. И. Метрология обеспечения качества количественного химического анализа / В. И. Дворкин. — Москва : Химия, 2001. — 263 с.

9. О достоверности метода акустической эмиссии для оценки кинетики сольватации / В. Л. Гапонов [и др.] // Вестник развития науки и образования. — 2010. — № 5. — С. 42–51.

10. Кузнецов, Д. М. Метрология акустико-эмиссионных параметров сольватации / Д. М. Кузнецов, П. Н. Козаченко, В. В. Дубовсков // Фундаментальные исследования. — 2011. — № 8. — С. 646–651.

11. К вопросу метрологической оценки метода акустической эмиссии как инструмента контроля процесса импрегнирования пористых материалов / В. Л. Гапонов [и др.] // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. — 2012. — № 2 (63), вып. 2. — С. 11–17.

References

1. Builo, S.I., Kuznetsov, D.M. Acoustic_Emission Testing and Diagnostics of the Kinetics of Physicochemical Processes in Liquid Media. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2010, vol. 46, iss. 9, pp. 684–689.

2. Kuznetsov, D.M., Bujlo, S.I., Ibragimova, J.A. Correlation Evaluation of the Acoustic Emission's Method the Tool of Exo Solvation Kinetik's Research. Chemical Technology: An Indian Journal, 2011, vol. 6, iss. 2, pp. 112–113.

3. Builo, S.I., et al. Acoustic-emission testing and diagnostics of the dissolution kinetics of crystalline components. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2012, vol. 48, iss. 10, pp. 53–56.

4. Builo, S. I., Kuznetsov, D. M., Gaponov, V. L. Acoustic Emission Testing of Capillary Liquid Flows in Porous Media. Russian Journal of Nondestructive Testing, 2014, vol. 50, iss. 7, pp. 19–23.

5. Kuznetsov, D.M., et al. Acoustic studies of the decomposition of hydrogen peroxide process. Nastoyashchi izsledvaniya i razvitie, 2014, Sofiya: Byal GRAD-BG, 2014, vol. 25, pp. 73–76.

6. Kuznetsov, D.M., et al. Metrologicheskie aspekty monitoringa ekologicheskikh protsessov po pa-rametram akusticheskoy emissii. [Metrological aspects of ecological processes monitoring by the acoustic emission parameters.] Kluczowe aspekty naukowej dzialalnosci — 2014: materialy X miedzynarodowej naukowi-praktycznej konferencji. [Key aspects of research – 2014: Proc. X Int. Sci.-Pract. Conf.] Przemysl: Nauka i studia, 2014, vol. 19, pp. 44–50 (in Russian).

7. Builo, S.I., Kuznetsov, D.M., Gaponov, V.L.; Parinov, I.A., Shun-Hsyung Chang, Somnik Theerakulpisut, eds. Acoustic Emission Diagnostics of the Kinetics of Physicochemical Processes in Liquid and Solid Media. Advanced Materials – Studies and Applications. New York: Nova Science Publishers, 2015, 527 p.

8. Dvorkin, V.I. Metrologiya obespecheniya kachestva kolichestvennogo khimicheskogo analiza. [QC metrology of quantitative chemical analysis.] Moscow: Khimiya, 2001, 263 p. (in Russian).

9. Gaponov, V.L., et al. O dostovernosti metoda akusticheskoy emissii dlya otsenki kinetiki sol'vatatsii. [On reliability of the acoustic emission method to assess solvation kinetics.] Bulletin of Science and Education Development, 2010, no. 5, pp. 42–51 (in Russian).

10. Kuznetsov, D.M., Kozachenko, P.N., Dubovskov, V.V. Metrologiya akustiko-emissionnykh parametrov sol'vatatsii. [Acoustic emission parameters of solvation metrology.] Fundamental'nye issledovaniya, 2011, no. 8, pp. 646–651 (in Russian).

11. Gaponov, V.L., et al. K voprosu metrologicheskoy otsenki metoda akusticheskoy emissii kak instrumenta kontrol-ya protsessa impregnirovaniya poristykh materialov. [On metrological evaluation of acoustic emission method as tool of po-rous materials impregnation control.] Vestnik of DSTU, 2012, no. 2 (63), iss. 2, pp. 11–17 (in Russian).

Поступила в редакцию 01.09.2015
Сдана в редакцию 01.09.2015
Запланирована в номер 22.01.2016

Сведения об авторах

Акопьян, Владимир Акопович, akop@math.rsu.ru	Южный федеральный университет, Россия
Антибас, Имад Ризакалла, imad.antypas@mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Бондаренко, Вероника Александровна, bva_rek@rgups.ru	Ростовский государственный университет путей сообщения, Россия
Бонилья, Венегас Феликс Владимир, tiranoruso@gmail.com	Донской государственный технический университет, Россия
Брагинец, Сергей Валерьевич, sbraginets@mail.ru	Северо-Кавказский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства, Россия
Варавка Валерий Николаевич varavkavn@gmail.com	Донской государственный технический университет, Россия
Волошин, Роман Николаевич, voloshin2909@gmail.com	Донской государственный технический университет, Россия
Гапонов, Владимир Лаврентьевич, v.gaponov6591@yandex.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Герасина, Юлия Станиславовна, ygerasina@gmail.com	Донской государственный технический университет, Россия
Григорян, Лусинэ Арсеновна, honey.lusine@mail.ru	Северо-Кавказский федеральный университет, Институт математики и естественных наук, Россия
Губанова, Александра Анатольевна, anatoliya81@mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Егоров, Максим Сергеевич, aquavdonsk@mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Егорова, Римма Викторовна, aquavdonsk@mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Жаров, Виктор Павлович, zharovvp@mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Забияка, Игорь Юрьевич zabiyakaigor@gmail.com	Донской государственный технический университет, Россия
Заковоротный, Вилор Лаврентьевич, vzakovorotny@dstu.edu.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Захарова, Мария Сергеевна, Zaharshuk@mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Карнаухов, Николай Федорович, nika811@bk.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Коробцов, Александр Сергеевич, dstu.koras@yandex.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Кочергин, Евгений Сергеевич, ev10011994@gmail.com	Воронежский государственный педагогический университет, Россия
Кудряков, Олег Вячеславович, kudryakov@mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия

Кузнецов, Дмитрий Михайлович, kuznetsovdm@mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Ле Ван Зыонг, leduong145@gmail.com	Донской государственный технический университет, Россия
Лимаренко, Николай Владимирович, nikolajj-limarenko@rambler.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Лукьянов, Александр Дмитриевич, lex1998@rambler.ru	Донской государственный технический университет Россия
Лукьянов, Борис Сергеевич, bluk@ipoc.sfedu.ru	Южный федеральный университет, Россия
Лукьянов, Виталий Федорович, vfl1@bk.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Милов, Алексей Александрович, aleksei_milov@list.ru	Южный научный центр Российской академии наук, Россия
Морозкин, Игорь Сергеевич, mis_tm@mail.ru	Ростовский государственный университет путей сообщений, Россия
Мохсен, Мохаммед Неама Мохсен, Mohammed.naima@gmail.com	Донской государственный технический университет, Россия
Нейдорф, Рудольф Анатольевич, ran_pro@mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Панов, Юрий Викторович, u-panov@yandex.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Партко, Светлана Анатольевна, parlana@spark-mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Пешхоев, Иса Мусаевич, peshkhoev@rambler.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Подуст, Сергей Фёдорович, PodustSS@nevz.com	Донской государственный технический университет, Россия
Полушкин, Олег Олегович, grunt@mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Полушкин, Олег Алексеевич, grunt@mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Пустовойт, Виктор Николаевич, fipm-dstu@mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Рожков, Евгений Васильевич, rozhkov@math.rsu.ru	Южный федеральный университет, Россия
Сибирский, Владимир Викторович, semo_s@mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Сиротенко, Андрей Николаевич, andsirotenko@yandex.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Соловьев, Аркадий Николаевич, solovievarc@gmail.com	Донской государственный технический университет, Россия
Статовой, Дмитрий Александрович, dr-monro@mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия

Сухинов, Александр Иванович, sukhinov@gmail.com	Донской государственный технический университет, Россия
Сухинов, Андрей Александрович, andreysukhinov@gmail.com	Южный федеральный университет, Институт компьютерных технологий и информационной безопасности, Россия
Токарева, Анна Николаевна, - tanna_ing@mail.ru	Донской государственный аграрный университет, Россия
Тугенгольд, Андрей Кириллович, akt0@yandex.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Филимонов, Максим Николаевич, maxfil2006@yandex.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Фофана, Исмаель Масму, nazyroo@mail.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Хлыстунов, Виктор Федорович, vniptim@gmail.com	Донской государственный технический университет, Россия
Чебаненко, Валерий Александрович, vchebanenko@sfedu.ru	Южный Федеральный Университет, Россия
Чернуцкий, Михаил Викторович, m1chaelc@yandex.ru	Северо-Кавказский научно - исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства, Россия
Чигринец, Евгений Геннадьевич, egchigrinets@gmail.com	ОАО «Роствертол», Россия
Шаповал, Борис Григорьевич, nba-shapoval@yandex.ru	Донской государственный технический университет, Россия
Шевцов, Сергей Николаевич, sergnshevtsov@gmail.com	Южный научный центр Российской академии наук, Россия
Ющенко Сергей Викторович xgridx@yandex.ru	Донской государственный технический университет, Россия

Index

Akopyan, Vladimir A.
akop@math.rsu.ru
Southern Federal University, Russia

Antypas, Imad Rizakalla
imad.antypas@mail.ru
Don State Technical University, Russia

Bondarenko, Veronika A.
bva_rek@rgups.ru
Rostov State Transport University, Russia

Bonilla, FelixVenegas V.
tiranoruso@gmail.com
Don State Technical University, Russia

Braginets, Sergey V.
sbraginets@mail.ru
North Caucasian Research Institute of Agricultural Engineering and Electrification of Agriculture, Russia

Chebanenko, Valery A.
vchebanenko@sfedu.ru
Southern Federal University, Russia

Chernutskiy, Mikhail V.
m1chaelc@yandex.ru
North Caucasian Research Institute of Agricultural Engineering and Electrification of Agriculture, Russia

Chigrinets, Evgeny G.
egchigrinets@gmail.com
“Rostvertol” JSC, Russia

Filimonov, Maxim N.
maxfil2006@yandex.ru
Don State Technical University, Russia

Fofana, I. Masmoud
nazyroo@mail.ru
Don State Technical University, Russia

Gaponov, Vladimir L.
v.gaponov6591@yandex.ru
Don State Technical University, Russia

Gerasina, Yulia S.
c-si-ge@mail.ru
Don State Technical University, Russia

Grigoryan, Lusine A.
honey.lusine@mail.ru
North Caucasus Federal University, Institute of Mathematics and Natural Sciences, Russia

Gubanova, Alexandra A.
anatoliya81@mail.ru
Don State Technical University, Russia

Karnaukhov, Nikolay F.
nika811@bk.ru
Don State Technical University, Russia

Khlystunov, Victor F.
vniptim@gmail.com
Don State Technical University, Russia

Kochgergin, Evgeny S.
ev10011994@gmail.com
Voronezh State Pedagogical University, Russia

Korobtsov, Alexander S.
dstu.koras@yandex.ru
Don State Technical University, Russia

Kudryakov, Oleg V.
kudryakov@mail.ru
Don State Technical University, Russia

Kuznetsov, Dmitry M.
kuznetsovdm@mail.ru
Don State Technical University, Russia

Le Van Duong,
leduong145@gmail.com
Don State Technical University, Russia

Limarenko, Nikolay V. Don State Technical University, Russia
nikolajj-limarenko@rambler.ru
Lukyanov, Alexander D. Don State Technical University, Russia
lex1998@rambler.ru
Lukyanov, Boris S. Southern Federal University, Russia
bluk@ipoc.sfedu.ru
Lukyanov, Vitaly F. Don State Technical University, Russia
vfl1@bk.ru
Milov, Alexey A. Southern Federal University, Russia
aleksei_milov@list.ru
Mohsen, Mohammed Neamah Mohsen Don State Technical University, Russia
Mohammed.naima@gmail.com
Morozkin, Igor S. Rostov State Transport University, Russia
mis_tm@mail.ru
Neydorf, Rudolf A. Don State Technical University, Russia
ran_pro@mail.ru
Panov, Yury V. Don State Technical University, Russia
u-panov@yandex.ru
Partko, Svetlana A. Don State Technical University, Russia
parlana@spark-mail.ru
Peshkhoev, Isa M. Don State Technical University, Russia
peshkhoev@rambler.ru
Podust, Sergey F. Don State Technical University, Russia
PodustSS@nevz.com
Polushkin, Oleg A. Don State Technical University, Russia
grunt@mail.ru
Polushkin, Oleg O. Don State Technical University, Russia
grunt@mail.ru
Pustovoyt, Victor N. Don State Technical University, Russia
fipm-dstu@mail.ru
Rozhkov, Evgeny V. Southern Federal University, Russia
rozhkov@math.rsu.ru
Shapoval, Boris G. Don State Technical University, Russia
nba-shapoval@yandex.ru
Shevtsov, Sergey N. Southern Scientific Centre of Russian Academy of Sciences, Russia
sergnshevtsov@gmail.com
Sibirskiy, Vladimir V. Don State Technical University, Russia
semo_s@mail.ru
Sirotenko, Andrey N. Don State Technical University, Russia
andsirotenko@yandex.ru
Solovyev, Arkady N. Don State Technical University, Russia
solovievarc@gmail.com

Statovoy, Dmitry A. Don State Technical University, Russia
dr-monro@mail.ru
Sukhinov Andrey A. Southern Federal University, Institute of Computer Technologies and Information Safety , Russia
andreysukhinov@gmail.com
Sukhinov, Alexander I. Don State Technical University, Russia
sukhinov@gmail.com
Tokareva, Anna N. Don State Agrarian University , Russia
tanna_ing@mail.ru
Tugengold, Andrey K. Don State Technical University, Russia
akt0@yandex.ru
Varavka, Valery N. Don State Technical University, Russia
varavkavn@gmail.com
Voloshin, Roman N. Don State Technical University, Russia
voloshin2909@gmail.com
Yegorov, Maxim S. Don State Technical University, Russia
aquavdonsk@mail.ru
Yegorova, Rimma V. Don State Technical University, Russia
aquavdonsk@mail.ru
Yushchenko, Sergey V. Don State Technical University, Russia
xgridx@yandex.ru
Zabiyaka, Igor Y. Don State Technical University, Russia
zabiyakaigor@gmail.com
Zakharova, Maria S. Don State Technical University, Russia
Zaharshuk@mail.ru
Zakovorotny, Vilor L. Don State Technical University, Russia
vzakovorotny@dstu.edu.ru,
Zharov, Victor P. Don State Technical University, Russia
zharovvp@mail.ru